

JAERI-Review

99-018



JP9950522



環境問題と廃棄物

1999年8月

三田村久吉・馬場恒孝・前田敏克・石山 孝

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

環境問題と廃棄物

日本原子力研究所東海研究所環境科学研究部
三田村久吉・馬場 恒孝・前田 敏克・石山 孝

(1999年7月7日受理)

環境問題は今や一国だけの問題にとどまらず、地球的規模で影響を及ぼすようになってきている。一方、現代の大量生産、大量消費、大量廃棄に伴う廃棄物問題もまた避けて通れない課題となっている。こうした中で、「環境モニタリングと修復・保全技術の開発」というテーマを掲げて技術開発を進めるにあたり、必要となる予備知識を得、その技術開発の方向性をさぐるため、書籍や論文等のレビューを行った。環境問題と廃棄物との係わりに注目し、主に地球環境の成り立ち、環境先進国の取り組み、日本の廃棄物問題、環境保全技術の適用例について述べている。

Environmental Issues and Wastes

Hisayoshi MITAMURA, Tsunetaka BANBA, Toshikatsu MAEDA and Takashi ISHIYAMA

Department of Environmental Sciences
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 7, 1999)

All countries in the world are concerned about environmental issues because of their global effects. Developed industrial nations are also confronted with waste issues accompanied by mass production, mass consumption, and mass dump. We have reviewed books and reports to obtain a preliminary knowledge and to understand the trend of technology development before we start R&D for "environmental monitoring, and environmental remediation and protection". We lay great emphasis on municipal and industrial wastes in environmental issues and summarize the history of the earth, innovative environmental approaches in advanced nations, waste issues in Japan, and examples of technology development for environmental remediation and protection.

Keywords: Environmental Issues, Waste Issues, Environmental Remediation and Protection, Municipal and Industrial Wastes, History of The Earth

目次

| | |
|----------------------|----|
| 1. まえがき | 1 |
| 2. 地球環境の成り立ち | 1 |
| 2.1 元素の生成 | 2 |
| 2.2 原始地球の誕生と成長 | 2 |
| 2.3 海の誕生 | 3 |
| 2.4 陸の誕生 | 3 |
| 2.5 大気 | 4 |
| 2.5.1 対流圏 | 4 |
| 2.5.2 乾燥ベルト地帯 | 4 |
| 2.5.3 成層圏 | 4 |
| 2.5.4 磁気圏 | 5 |
| 2.6 資源の濃集 | 5 |
| 2.7 生命の誕生 | 5 |
| 2.8 21%の酸素 | 7 |
| 2.9 0.03%の二酸化炭素 | 8 |
| 2.10 植物の上陸 | 9 |
| 2.11 生物の大量絶滅 | 10 |
| 2.12 氷河期 | 11 |
| 2.13 人類の誕生と環境破壊 | 12 |
| 3. 環境先進国の取り組みと日本との対比 | 14 |
| 3.1 デンマーク | 14 |
| 3.2 ドイツ | 15 |
| 3.3 日本 | 17 |
| 4. 日本における廃棄物問題 | 17 |
| 4.1 都市ゴミのリサイクルの現状 | 18 |
| 4.1.1 古紙 | 18 |
| 4.1.2 アルミ・スチール缶 | 18 |
| 4.1.3 ガラス瓶 | 18 |
| 4.1.4 カセットボンベ、スプレー缶 | 19 |
| 4.2 有害廃棄物 | 19 |
| 4.2.1 保存性物質 | 19 |
| 4.2.2 非保存性物質 | 20 |
| 4.2.3 保存性・非保存性混合物質 | 32 |
| 5. 環境保全・修復技術の適用例 | 33 |
| 5.1 ダイオキシン分解技術の開発 | 33 |
| 5.2 素材の開発 | 34 |
| 5.3 再利用技術の開発 | 34 |
| 5.4 資源循環型社会をめざした開発 | 35 |
| 6. あとがき | 36 |
| 参考文献 | 38 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. History of The Earth | 1 |
| 2.1 Formation of Elements | 2 |
| 2.2 Generation and Growth of Primitive Earth | 2 |
| 2.3 Sea | 3 |
| 2.4 Continent | 3 |
| 2.5 Atmosphere | 4 |
| 2.5.1 Troposphere | 4 |
| 2.5.2 Dry Zones | 4 |
| 2.5.3 Stratosphere | 4 |
| 2.5.4 Magnetosphere | 5 |
| 2.6 Concentration of Resources | 5 |
| 2.7 Appearance of Life | 5 |
| 2.8 Oxygen of 21% | 7 |
| 2.9 Carbon Dioxide of 0.03% | 8 |
| 2.10 Landing of Plant | 9 |
| 2.11 Mass Extinction of Living Being | 10 |
| 2.12 Glacial Age | 11 |
| 2.13 Environmental Disruption due to Human Being | 12 |
| 3. Comparison of Measures between Advanced Nations and Japan | 14 |
| 3.1 Denmark | 14 |
| 3.2 Germany | 15 |
| 3.3 Japan | 17 |
| 4. Waste Issues in Japan | 17 |
| 4.1 Recycling of Municipal Waste | 18 |
| 4.1.1 Waste Paper | 18 |
| 4.1.2 Aluminum and Steel Cans | 18 |
| 4.1.3 Glass Bottles | 18 |
| 4.1.4 Cassette Cylinders and Spray Cans | 19 |
| 4.2 Hazardous Waste | 19 |
| 4.2.1 Conservative Hazardous Material | 19 |
| 4.2.2 Non-Conservative Hazardous Material | 20 |
| 4.2.3 Mixture of Conservative and Non-Conservative Hazardous Materials | 32 |
| 5. Examples of Technology Development for Environmental Remediation and Protection | 33 |
| 5.1 Decomposition of Dioxins | 33 |
| 5.2 New Materials | 34 |
| 5.3 Recycling Technology | 34 |
| 5.4 Recirculation-Type Society | 35 |
| 6. Conclusion | 36 |
| References | 38 |

1. ま え が き

人間の活動は歴史上かつてないほどに活発化し、遺伝子操作に代表されるように、科学技術の進歩によって生命の根源にまで人間が立ち入る時代となっている。また、産業の発達は大量生産を可能にし、より安価で、より高品質の製品を多くの人に行き渡らせる一方、大量消費、大量廃棄の時代を築いてきた。その結果排出される膨大な量の廃棄物は、処理施設的能力を越えようとしており、深刻な廃棄物問題を引き起こしつつある。さらに、大量生産、大量消費、大量廃棄によって環境中に放出された多種多様な化学物質は地球規模での環境汚染を引き起こし、例えばフロンガスによるオゾン層の減少、二酸化炭素による温暖化、酸性雨の影響、焼却過程で発生するダイオキシンの影響、外因性内分泌攪乱物質の生物への影響などは早急な取り組みを必要とする問題として人々の重大な関心事となっている。地球の大きさが日常感覚から見ると巨大であるが故に、地球は無限の容量を持っているものと錯覚されてきた。しかしながら、地球に関する知識が集積されるにつれて、地球環境が実は非常に微妙なバランスの上に成り立っていることが明らかとなってきている。

国境を越えて影響を及ぼす環境問題は、今や世界共通の関心事となっており、廃棄物問題もまた環境問題を考える際には避けて通ることのできない重要な課題のひとつである。こうした現実の重要な問題を前にして、われわれは「環境モニタリングと修復・保全技術の開発」という新たな研究・開発テーマを掲げ、1999年4月から環境問題に係わろうとしている。このため、実際の環境問題にたいして、環境修復・保全技術の開発というテーマが果たして成り立ち得るのか、何が環境汚染となり、どのように修復・保全するのが合理的なのか、どういった技術が求められているのかなど、基本的な視点を明確にしておく必要がある。このため、本報では、関連する書籍や論文等のレビューを行うことにする。まずはじめに、現在の地球環境がどのようにしてできあがったのか、これまでにどれほど長い時間を要してきたものかについてその歴史をながめ、地球環境が実は非常に微妙なバランスの上に成り立っており、しかもその緩衝作用が無限ではないことを再認識しておきたい。ついで、欧州の環境先進国の野心的な取り組みとその成果をながめ、原則的なことをごく当たり前に行うことによって環境問題がかなり緩和されるという実例を見てみることにする。これにより、環境問題は解決可能であるという見通しを得るとともに、環境問題に対する今後の日本の行政や産業の対応の仕方、環境修復・保全技術の将来像などが見えてくるものと期待できる。さらに、環境問題と深い係わりを持つ廃棄物問題に注目し、われわれが当面の開発テーマとして掲げた「焼却灰等廃棄物の安定化処理技術の開発」の背景について問題を掘り下げてみたい。最後に、環境修復・保全技術の開発として行われているわれわれの回りでの具体的な取り組みについてその実例をながめ、これから取り組むべき開発方向について具体的なイメージを得ようと考えている。

2. 地球環境の成り立ち

NHK取材班¹⁾や松井等²⁾の著作は地球環境の歴史をつかむのに格好の材料を提供してくれる。ここでは、これらの文献を引用して、現在の地球環境ができ上がるまでの歴史をざっとながめてみることにする。現在、地球と太陽との距離は約1億5千万km（1天文単位）である³⁾。地球に液体の水が存在

するためには、地球の軌道が、太陽から1億3千万～1億6千万kmの範囲になければならない。しかも、この3千万kmという幅は、地球の気温が摂氏零度から百度の間になるための条件であって、現在の平均気温である摂氏15度を保つとなると、その許容幅はさらに小さくなる。流れ、蒸発し、雲をつくって雨を降らす地球の水、この変転きわまりない水の循環が、地球にその後のあらゆる特徴をもたらしてきた。それはきわめて狭い温度の幅の中に、地球の温度が保たれてきたからにはほかならない。ほどよい太陽からの距離、水の量、地軸の傾き、大気成分、多くの好運が一つのハーモニーのように重なりあい、この奇跡ともいべき水の惑星をつくり上げてきた。

今から20億年前には、酸素を出す生物が発生した膨大な酸素により地球の大気にも酸素が現れてきた。大気中に酸素が増えるにつれて、成層圏のオゾンも増え、太陽の紫外線をうまく吸収してくれるようになった。生命がつくり出した大気が、生命自身を守る性質を持つにいたったのだ。幾十にも張り巡らされたバリアによって、地球は生物たちの安全な住処となった。この多重バリアの底で、生命は時間をかけ思う存分進化を遂げてきた。始めは単純な形から、次第に複雑で精緻な生物へと変身は続いてきた。生物と地球は別物ではなかった。地球という環境が生命をつくり出し、生命は逆に地球をつくり変えていった。そして、進化していく地球に合わせるかのようにして、生命は進化し、人類を頂点とする地球の生物圏がつけられた。46億年にわたる地球と生命の共同作業こそ、地球の独自の姿なのである。

2.1 元素の生成^{1),2)}

宇宙は百数十億年前、ビック・バンと呼ばれる大爆発から始まったと考えられている⁴⁾。誕生直後 10^{-44} 秒後の宇宙の大きさは 10^{-33} cmと小さく、温度は 10^{32} 度と高温で、エネルギー以外には何も存在していなかった⁵⁾。この生まれたての宇宙はすさまじい速度で四方に拡大し、これに伴って宇宙は次第に冷えていく。やがて、素粒子が生まれ、電子や原子核が生まれつつ、宇宙の拡大は続く。そして約30万年後、温度が3千度Kにまで下がると、原子核と電子が結合して原子が生まれた。この時つくられた原子は、水素やヘリウムなどの単純な元素であった。これよりも複雑な多くの元素は、この後、星の中でつくられた。水素が星の内部で燃えることによって重いほかの元素に変身し、水素が燃えつきて生涯を終えた星の最後の爆発によっても、さらに複雑な元素がつくられた。宇宙は星の誕生と死をくり返しながらか、次第に複雑な原子をつくっていった。

2.2 原始地球の誕生と成長^{1),2)}

約46億年前に、銀河系の片隅で一つの星が超新星爆発を起こしてその一生を劇的に終えた。この爆発の衝撃波により、あたりを漂っていたごく薄いガスや塵のような物質が吹き寄せられ一つの大きな渦ができた。渦の中心には物質の大部分が集まって原始太陽が生まれ、周辺の塵は円盤の赤道面に沈降して集積し、無数の微惑星が誕生した。さらに、微惑星同士の衝突が何度も繰返されるうちに、あたりを圧して巨大に成長したものが目立つようになってきた。その一つが原始地球で、大きく成長した原始地球に引きつけられた微惑星は、猛スピードで地表に衝突し、大小さまざまなクレータをつくり、さらに原始地球を成長させていった。

原始地球が大きくなるにつれて引力も大きくなり、突入してくる巨大な微惑星の速度はますます速

くなる。地表での衝突はますます大規模で激しいものとなり、巨大な衝突のエネルギーによって地表は溶け、マグマの湖となる。一方、衝突の時に中から飛び出した気体成分は原始の大気をつくり、この大気の温室効果により衝突によってできたマグマの湖はいつまでも冷えることがない。マグマの湖はつぎつぎにつくられて、地球表層部全体がマグマに覆われたマグマの海が誕生する。マグマの海の中では、物質は重いものと軽いものに分かれ、重力の法則に従って移動していった。微惑星の成分の中から、重い鉄分が沈み始め、軽い岩石分と入れ代わる。軽い岩石分は表面近くにとどまり、重い鉄分は地球の核のまわりに落ち込んでいく。このこのとき解放される重力エネルギーで、地球全体が完全に熔融したと考えられている。

2.3 海の誕生^{1),2)}

マグマの海の上には、おびただしい量の水蒸気を含む原始大気がとりまき、はるか上空には原始の雲が分厚く垂れ込めていた。この雲は、地表の温度が高温のため降りてくることができなかつた。一方、雲の上では、生まれたての太陽が放つ紫外線により、水蒸気が酸素と水素に分解され、軽い水素は地球の引力を離れて、しだいに宇宙へと飛び去っていた。

地球がほぼでき上がって微惑星の衝突も減ってくると、マグマの海もしだいに冷え、雲もしだいに地表に降りてくる。地表の気温が約300℃になったとき、ついに雨が降り始めた。熱い地面は急激に冷やされ、気温が下がってまたつぎの雨を呼ぶ。豪雨となって地上に降り注ぐ雨は低い場所を求めて激流となった。低地の池はやがて湖になり、つながってはその面積を拡大し、海が誕生した。このとき、地球は海に取り囲まれていたと考えられている。大気には酸素がないものの、地球は豊かな海を得た。

2.4 陸の誕生^{1),2)}

地球は冷えて地殻の厚さは増し、地球の内部では渦巻いていた動きが統一され、大きな対流を起こすようになった。対流の上昇部では、熱は地殻を持ち上げ、大地を引き裂き、そこから熱を放出するようになる。地殻はいくつかに割れ、地球内部の対流の動きによって、地表は動き始めた。割れ目の反対側では、地殻どうしがぶつかり合う。こうして火山島や大陸性の軽い物質が寄せ集められ、やがて大陸の核となる陸を形成してくる。こうして誕生した陸は、後から誕生する陸のかけらを集めて徐々に大陸へと成長していった。

約20億年前から今日までの長い年月の間には、地球の表面はさまざまに変わってきた。大陸の下では熱は伝導で移るだけであるから、効率が悪く、熱がたまりやすい。大陸の下に熱がたまると、そこに地球内部のマントル物質の上昇流が起こり、大陸を下から突き上げ、大陸を割る。分裂した大陸は流れるように動いていくが、地球は丸いために、再びどこかで大陸と大陸が衝突し、新たな大陸ができる。この衝突のとき大陸と大陸の間にあった海底は持ち上げられて陸になる。地球表面は、約2億年単位でこのような分裂と衝突をくり返していたと考えられている。

地球はいまだに地殻の下に灼熱した部分を残し、内部に存在する放射性元素が崩壊熱で作り出す以上の熱を外に放出している熱い星である。この熱は地球の表面に複雑な運動を引き起こし、同時にさまざまな物質の結合や離散を促す物質循環の原動力となっている。膨大な熱は、3つの経路をた

どって放出されている。1つ目は地殻の熱伝導。2つ目は火山で、マントルに直接通じた穴から、煙突のように熱を放出している。陸上の火山による噴出物の総量は年間 1km^3 と推定されている。3つ目は、対流するマントルの上昇部にあたる、総延長7万4千 km におよぶ海底の巨大火山山脈（海嶺）で、最大の熱放出口となっており、海水の対流によって効率的に冷やされる。海嶺で噴出する溶岩の総量は年間 15km^3 にもおよぶ。

2.5 大気^{1),2)}

地球大気はコスミックダストのような宇宙から訪れる危険を何気なく防いでくれている。大気の外側の宇宙は、極めて極端な環境である。この宇宙から見れば、生命は極めて弱く、複雑すぎる存在である。温度の変化にも、物理的衝撃にも、放射線にも弱く、たちまち死滅してしまう。宇宙で、このもろい生命がつつがなく存在するためには、穏やかな気候と、特別よくできた防護壁が必要となる。この役割を果たしているのが大気の中性気体や電離気体である。対流圏、成層圏、磁気圏といった幾重にも張り巡らされた生物たちのバリアは、巧みにつくられているからこそ、もろく崩れやすいものである。地球は、46億年という歴史の全体をついやして、この多重バリアを鍛え、育ててきた。それは堅固であるように見えて、実は地球表層のごく薄い膜のようなものにすぎない。

2.5.1 対流圏

地球には、 $1.4\text{kW}/\text{m}^2$ （＝毎分 $2\text{cal}/\text{cm}^2$ ）の太陽エネルギーが降り注いでいる³⁾。このうち約70%は雲や地表で反射され、地球を暖めるのに使われるのは、残り約30%である。対流圏では絶えず風が吹き、雲が湧いて雨が降り、大気は活発な対流を行っている。この活発な大気の移動は、対流圏の空気が一般に下ほど暖かくて軽く、上にいくほど冷たくて重いことによる。赤道付近は、太陽からの放射エネルギーを他のどの地域よりも多く受ける。その熱は大気に伝えられ、急激に上昇した気流は冷やされて雲をつくる。水蒸気をほとんど雲として出し切った空気は、赤道の上層から南北に向かって広がっていく大きな大気の流れを形成する。この大気の動きは、きわめて乾いた空気となって、南北30度付近の乾燥ベルト地帯に吹き降ろす。さらに、高緯度の日本付近では絶えず温かい空気と冷たい空気がせめぎ合い、その上空には、ジェットストリームが蛇行しながら地球を取り巻いている。さらに、熱帯の海域で発生する台風が、対流圏の熱気と冷気の不揃いな分布を調整している。大気が垂直に動き上昇するとき雲がわき、水平に動いて南北に移動するとき、地球を取り巻く大きな循環が始まる。太陽の熱が大気循環のエンジンとなって地球全体の大気を動かしているのである。

2.5.2 乾燥ベルト地帯

地球に大気ができた時から熱交換の一環として大気循環は生まれた。この大気の循環によって、地球上に2つの乾燥ベルト地帯ができ、その下に大陸があると砂漠ができる。しかし、大陸は地球の表面を移動している。そのため、ある地点の気候は、それが属する大陸が地球上のどこに位置しているかによって変わってくる。さらに、乾燥ベルト地帯が、氷河の発達により、数千年という短い時間で、拡大・縮小したり、南北にズレたりしていた。また、最近の砂漠の拡大には、人間の活動が原因していると考えられている。例えば、現在、年間2億5千万tもの砂塵の吐き出ししているサハラ砂漠も、いつの時代にも砂漠であったわけではない。

2.5.3 成層圏

成層圏では、上層の空気の方が暖かくて軽く、下層の方が冷たくて重い。このため、成層圏では対流が起こらず、大気はきわめて安定している。この成層圏の薄い大気の中には、太陽の紫外線を吸収して、生物を守ってくれるオゾンの層が成立している。しかし、今、この重要なオゾン層がフロンガスによって減少してきている。安定したフロンガスも太陽からの紫外線によって分解され、塩素が分離してくる。この塩素はオゾンの酸素原子3個のうちの1個を奪う形で、オゾンを次々に分解していくのである。対流圏では無害であったはずのフロンガスは成層圏に混入するや、有害なガスに変化する。

2.5.4 磁気圏

地球はそれ自体1つの巨大な磁石である。外殻の対流によってできるその磁石は地球全体を1つの磁場にすっぽりと包み、磁気圏をつくり出している。太陽系では、太陽が持つ強力な磁場が空間を支配し、オーロラを発生させる高速の太陽風が絶えず吹いている。地球の磁場はこの太陽風の方向を変え、地球に直接吹き込んでくるのを防いでいる。

2.6 資源の濃集¹⁾

鉱物資源をはじめとするさまざまな資源も、進化を続ける生きた星であるからこそ生み出されている。資源として鉱物を利用できるのは、濃集という自然のメカニズムがあるからである。鉱物資源の濃集は、46億年という地球の進化の歴史がつくり出してきた地球独自のメカニズムである。例えば、アンデスの銅鉱床は、マグマから分離した水を運搬役に、非金属の塩素や硫黄を仲立ちにして銅が濃集し、硫化物として結晶化したものが、さらに地下水の働きにより二次濃集を受けてつくられた。海底熱水鉱床でも、水と塩素を仲立ちにして、冷却によって銅の硫化物が結晶化するというメカニズムは同じである。数百万年、数千万年という気の遠くなるような時間をかけて濃集したこうした鉱物資源は、一度利用したら、二度と補充されない供給量の固定した資源である。

生物の働きでつくられた資源もある。例えば、太古の木が地中で炭化してできた石炭、海の生物の遺骸が元になった石油、サンゴの死骸からつくられた石灰岩などはその典型である。また、人々は、グアノとよばれるグアナイの糞を採取し、肥料として利用してきた。これは、大気中の窒素が海水に溶け、その窒素がプランクトン、魚、鳥という生物の体内を通り、肥料となったものである。生物による濃集という観点からながめた場合、現代の巨大都市群も、そこから生みだされる大量の廃棄物も、人間による資源の濃集とみることができる。この濃集は、生物の体内を経ない新たなメカニズムで行われているものの、ひょっとしたら数百万年先に出現するかもしれない新種の生物がこれらを新たな資源として利用することになるかもしれない。生物が生み出すこうした資源の濃集も、ほかの星では見ることのできない地球独自の進化の証である。

2.7 生命の誕生^{1),2)}

生命の進化という視点から見ると、宇宙はその歴史の全体を費やして生命の材料を準備してきたといえる。素粒子から原子へ、原子から分子へ、分子から有機物へ、宇宙は地球の誕生までに、すでに生命への長い道のりを歩んでいた。しかし、宇宙ではこの過程が一つの方向にのみ進んできたのではない。特に宇宙にあまねく存在している紫外線にあたると、分子の結合は壊されてしまう。宇宙は合

成の場であると同時に、破壊の場でもある。宇宙の中で生命が誕生し進化していくためには、この紫外線を遮るための日陰をなんらかの形でつくるしかない。

地球へと集まった物質の中には、もう生命の材料が準備されていた。しかし、生まれたての原始地球には、紫外線が遮るものもなく降り注いでいた。たとえ分子が複雑な結合をつくり出すことがあっても、紫外線を遮ってくれるものがなければ、それはたちまち破壊されていただろう。分子の長い結合をつないで、生命誕生への長い道のりを順調にたどるには、その過程を紫外線から守るものがなければ不可能である。地球の初期に紫外線を吸収するフィルターの役割を果たしたのが、海の水であった。海の水が10mあれば太陽からの紫外線を十分吸収できる。

生命が誕生する前の原始の海で、元素同士の混沌とした離合集散が長い時間にわたって続いた。このときの地球の大気中にも海にも、気体状の酸素は存在していなかった。酸素はいろいろな物質と反応を起こしやすく、気体状の酸素があつては、海の中で生命がアミノ酸から合成されるときに一種の燃焼作用がおきて害となった。幸いにも原始地球には酸素が海水中に含まれていなかったために、生命の化学進化が促進され、生命物質がつけられた。

今から約40億年前、地球に生命が誕生した。生物にいたらなかった無数の結合の中に、きわめて風変わりな特徴を持つ分子が誕生した。その特徴というのは、自分と同じ結合を持つ分子をつくるという性質だった。これを可能にしたのが、生命の根源ともいべき遺伝子である。ただの物質を規則正しく組み合わせて複雑な物質をつくり、そこに命を吹き込むのは遺伝子の驚くべき性質である。生物の個体には寿命があつて、無限に生き続けることはできない。しかし、遺伝子は、必ず次の世代に伝えられていく。地球に生命が誕生したときから、この遺伝子は変化を重ねながら現在に至るまで伝えられてきた。人類を含むあらゆる地球上の生命の体には、共通の性質を持つ遺伝子が含まれている。それは、かつて誕生した1種類の遺伝子の子孫だと考えられている。

生命は、誕生後も地球の歴史の大半を海の中で過ごしてきた。陸上には有害な紫外線が降り注いでいたため、上陸することができなかった。その後生物は進化を始め、酸素を必要とせず、また酸素を放出することもない嫌気性の生物は、当時の地球の海に大繁栄したと考えられている。35億年まえに、生物進化上最大の出来事が起こった。水と二酸化炭素から太陽光線を利用してエネルギーを生みだし、酸素を放出する新しいタイプの生物、すなわち光合成生物が突然変異によって現れたのである。この新しい生物の栄養をとり入れる方式は、嫌気性のものに比べて約20倍も効率がよいため大繁栄することになる。こうした新しいタイプのバクテリアであるラン藻⁶⁾によって大量の酸素が海の中に放出され、当時の地球に大きな影響を及ぼすことになる。

ラン藻は、最初のころは少数派としてこっそり当時の海に生きていたが、20億年前になると大繁栄し、酸素を大量に放出するようになった。嫌気性の生物にとっては酸素が出現すると、酸素によって酸化され、一種の燃焼が起きて分解されてしまうために毒となる。このため、嫌気性生物の多くはこの時代に死滅し、一部は酸素の進入してこない土の中や泥の中などに逃げ込むことになった。火山地帯や深海底の熱水噴出中で今も生きているバクテリアの祖先も、このころに追いやられたものと考えられる。

酸素が大量に放出されるようになったとき、環境中に毒物がたまり始めたのだから、多くの細菌にはたいへん迷惑な出来事であった。酸素の毒性に悩んでいた細菌の中から、毒性のもとである活性酸

素や過酸化水素を分解する酵素を発明してこれらの毒性物質を分解するようになった細菌が現れた。いったん、解毒の仕掛けを身につけた細菌は、同じ食べ物をとったとき、酸素を使うと20倍も効率よくエネルギーを引き出すことが出来るため、逆に酸素を積極的に利用するようになった。酸素呼吸をおぼえて、エネルギー獲得の効率が上がった生物は、細胞をより複雑精緻なものに改造した。こうして、地球の生物は、好気性生物によってとって代わられていくことになる。

今から16～17億年前に、原核生物から真核生物が誕生した。細胞の中に核をつくり、その中に遺伝子を収納した。また呼吸はミトコンドリアが受け持つというように、細胞の中の分業体制ができあがった。核を持つ細胞を発明した生物は、次に性を発明した。性の成立は2つの遺伝子のセットを組替えては子孫を作ることになるので、進化の速度を速めた。生命が誕生して以来、30億年ぐらいの間に進化はゆっくりとしか進まず、微生物以上の高等な生物を生み出すことはなかった。核を持ち複雑な体制を整えた細胞は、ただ引きちぎるような分裂の仕方では増えるわけにはいかず、有糸分裂で増殖していた。それが、減数分裂で生殖細胞をつくり、これを利用した有性生殖を始めた。最近の6億年ほどの間に、進化は爆発的な勢いで進み、ついにはヒトを生み出したが、その急展開の基礎は性の成立である。

2.8 21%の酸素^{1),2)}

現在の地球の大気をユニークなものにしているものは、地球誕生後の生命活動によってつくられた酸素が、地球の大気の21%を占めているということである。微惑星の衝突の際揮発した物質により原始の大気が生まれたが、主なものは水蒸気、二酸化炭素、窒素、亜硫酸ガス、塩化水素であった⁷⁾。酸素が気体として飛び散ったとしても、酸素は酸化力が強いので、ほかの元素と結びついて二酸化炭素や岩石に変わってしまう。従って、大気中には、酸素はなかった。原始の海は非常に熱く、塩化水素が溶け込んでいたため、酸性度も大変強かった。このため、地球表層の岩石と接触して、様々な金属イオンを溶かし出し、海水の酸性度をしだいに中和していった。大量の鉄もイオンとして溶かし出されていた。

この海で、光合成を行う新しいタイプの生物が大繁殖することによって、酸素が大量に放出され、溶けていた鉄は酸素と結びつき、不溶性の酸化鉄となって海底に沈殿し始めた。18億年前には、海水中の鉄はほとんど沈殿し尽くしてしまったと考えられている。光合成生物が繁殖を続け、海中で放出された酸素の鉄による吸収が少なくなると、やがて酸素が大気中にもれるようにして放出されてくる。この時、地球の大気は初めて、酸素を含むようになった。当時の陸は、荒れ果てた大地にすぎなかった。この大地を、海から放出された酸素が覆うこととなり、大地は酸化され、真っ赤になった。

その後、生物も進化し、陸上植物が現れた4億年前には、現在の酸素量と同じ21%の酸素が大気中に存在するようになる。地球の大気中の酸素は、生物の進化とともに増えていった。生命は、地球をつくり変えてきた。その最大のもは、酸素を放出したことであった。酸素は海水中に水として大量に存在する。その水と二酸化炭素を利用して、生物は自分の身体をつくり、余分なものとして酸素を放出した。この酸素が、海に、大気中に酸素を含ませる結果となった。

酸素は生命の進化の流れをも変えた。いったん放出した酸素を、もう一度呼吸によって身体の中に取り入れることによって、エネルギーを飛躍的に引き出すことに成功したのである。水の中に浮かぶ

ことしかできなかった生物は、筋肉を発達させ、ヒレを持ち、手足や羽を持ち、運動することが可能となった。この運動には、酸素から引き出されるエネルギーが必要であった。生物はしだいに高等生物へと進化し、生命爆発の地球へと足どりを速めていったのである。

2.9 0.03%の二酸化炭素^{1),2),7)}

もう一つ地球の大気をユニークなものにしているものは、大気中に含まれる二酸化炭素がきわめて少ないという事実である。地球型惑星である金星や火星の大気の90%以上が二酸化炭素で占められているのに対して、現在、地球の大気にはわずか0.03%しか含まれていない。二酸化炭素がこの量に保たれているからこそ、地球は適度な温度を持つ温和な星でいられる。

原始大気の組成は水蒸気、二酸化炭素、窒素、亜硫酸ガス、塩素ガスが主体であった。このうち、水蒸気は地表が冷え始めると、雨となって地上に降り注ぎ海をつくった。できたばかりの原始の海には、大気中の塩化水素や亜硫酸ガスが溶け込み、かなり強い酸性となっていた。酸性の海は岩石と反応して、ナトリウムやカルシウムなどの陽イオンを溶かし込み、海水は中和される。二酸化炭素は、酸性の水には溶けないが、中和した水にはよく溶ける。こうして大気中の二酸化炭素は海水に溶け込み始めた。海水に溶けた二酸化炭素は海水中のカルシウムと反応して炭酸カルシウムをつくり、沈殿し、堆積して石灰岩となる。こうして、大気中の大量の二酸化炭素は次々と海に食われて減り始めた。当時の地球は温度が今よりもずっと高く、化学反応が起きやすい状態だったため、これらの反応は急激に進んだと考えられている。生命の誕生以前に大気中の二酸化炭素が、海水との純粋な化学反応によって石灰岩となり、急激に減少を始めていたことになる。やがてこれに生物が加わり、石灰岩をつくり始めることになる。

35億年ほど前には大気中の二酸化炭素は1気圧程度まで下がったと考えられている。海で固定された石灰岩はいつまでも石のままではいるわけではない。地球の表面は長いタイムスケールで見れば激しい地殻変動によって絶えずかきまわされている。その結果、地上に押し上げられた石灰岩は、長い年月の間に水に溶かされ、閉じ込められていた二酸化炭素は再び海に戻る。一方、地中深く埋没した石灰岩はやがてマグマの一部となり、火山ガスに含まれ二酸化炭素となって大気中に放出される。こうしたメカニズムによって再び二酸化炭素に戻っていく。そして、それがまた海で石灰岩となって固定される。言い換えれば、大気中に充満していた数十気圧の二酸化炭素が海に溶け始めた時から、断ち切られることのない二酸化炭素の循環が始まった。

二酸化炭素の循環の現在のシステムをながめてみると、大気中には、主に生物の呼吸、腐敗による分解、火山活動、石炭や石油などの化石燃料の消費によって二酸化炭素が絶えずつけ加わっている。その一部は、陸上植物の光合成に使われて取り込まれるが、それとほぼ同じ量の二酸化炭素が呼吸や枯死による分解によって大気中に放出されている。したがって、陸上植物全体として見れば、二酸化炭素の収支はほぼバランスがとれていて二酸化炭素の吸収源とはなっていない。結局、二酸化炭素の吸収源は海だけとなる。

海には大量の二酸化炭素が溶けている。その量は大気中の二酸化炭素の60倍にもものぼり、海そのものが二酸化炭素の大きな貯蔵庫でもある。この貯蔵庫から海の生物によって常に二酸化炭素が持ち出され、石灰岩として固定されている。それを実際行っているのが、石灰質の殻をつくる生物である。

例えば、光が十分にとどく浅い海に見られるサンゴ礁は、サンゴがつくりあげた石灰岩の巨大な構築物である。サンゴ以外にも、石灰藻、石灰海綿、有孔虫やコッコリスなどの単細胞プランクトンが重要な働きをしている。こうした生物の働きで海の中の二酸化炭素が減った分だけ、大気中から二酸化炭素が海に溶け、補給されている。

仮に、現在の二酸化炭素量が突然2倍に増えたとしても、その大部分は数千年で海に吸収されてしまう。海は大気中の二酸化炭素の変動に対して、これを打ち消す能力を持っている。しかしながら、数百年以内の短いタイムスケールでながめるとき、産業革命以降、大量に燃やし続けた化石燃料による大気中の二酸化炭素の急激な増加に対しては、海はその半分しか吸収してこなかった。その結果、過去200年の間に大気中の二酸化炭素を30%も増加させてきた。もし、このまま増え続け、21世紀後半に二酸化炭素の濃度が0.06%に達すると、その温室効果のため地球の平均気温が2~3度上昇すると予想されている。新生代第四紀の氷期と間氷期という激しい気候変動でも、平均気温が2~3度上昇または下降するのに2~3千年という時間がかかっていることを考えると、その変化がいかに急激なものであるかが分かる。

2.10 植物の上陸¹⁾

地球全体を見まわした場合、緑の面積は意外に少ない。草もほとんど生えない不毛の地が、陸地面積の5分の1にも達する。森林は陸地面積の4分の1を覆うにすぎない。しかし、森林は、地球上に存在する生きた植物体総量の90%近くを占めるばかりでなく、陸上の全植物が生産する有機物の60%以上を担っている。さらに、陸地から蒸発する水の半分近くを担っている。森林を含めた緑は、自らが生きているだけでなく、すべての陸上生物の生活を支えている。ところが驚くべきことには、今から4億年ほど前までは、陸上に緑というものが全くなかったのである。植物が全く生えていない陸地は、乾燥していて寒暑の差が著しく、ときおり雨が降ると、決まって大豪雨となる。いったん雨が降ると、雨粒は激しい勢いで地面にたたきつけられ、水は鉄砲水となって一気に流失して、つなぎ止めるものがない土砂を押し流し、複雑に地表をえぐり、無数に分流しながら海に向かう。

植物の歴史は進化の段階によって大きく4つの時代に分けることができる。藻類の時代、シダ植物の時代、裸子植物の時代、そして現在の被子植物の時代である。このうち最も長かったのは藻類の時代で、30億年近くも続いたのである。海の中で藻類は、ゆっくりとではあるが進化を続けていた。緑藻、紅藻、褐藻などである。すべての藻類が、葉緑素のほかに種特有の色素を持ち、光合成を行う点では共通している。このうち、10億年前に現れた緑藻は、陸上植物と同じ構成の葉緑素を持ち、海だけでなく淡水にもすむことができる。このため、最初の陸上植物は緑藻類から分化して出現したものと考えられている。

最初の陸上植物が出現する少し前、世界的な地殻変動があった。その結果、それまで海であったところが陸化したりして地表の様子は劇的に変化した。それまで浅い海に生活していた緑藻は陸地が広がるにつれて、あるものは湖沼や湿地に生活の場を移すことを余儀なくされ、しだいに体制を変えていったに違いない。水分や栄養分を運び、体を支えるために維管束を整え、水分を逃がさないよう表面に覆いを持ち、二酸化炭素の取り込みと水分の蒸散を調整するために気孔を備えた。このころには、陸上の環境の面でも、すべての生物にとってきわめて有害な紫外線をカットしてくれるオゾン層

が形成されていた。

4億年前に陸上に進出した植物は、それから5千万年ほどのあいだに、根、茎、葉を発達させ、あるものはかたい木質組織を持つようになった。そして今から約3億5千万年前には、湿地帯に森林が出現した。やがて湿地帯には巨大なシダ植物の大森林が広がるようになり、これが石炭となった。2億2千万年前になると裸子植物が主役に躍り出てきた。シダ植物では、胞子が発芽して前葉体をつくり、この中で精子と卵がつくられる。精子は水の中でしか移動できないため、受精のためにはとにかく水が必要である。このため、シダ植物の分布は湿地や水辺に限られていた。

植物の進化の歴史は、いかに水辺から離れ、乾燥した内陸部へ生息域を広げるかという歴史であった。植物はそのために、体のつくりや生殖の方法を変えてきた。何度か起こったそうした大きな変革の中でも、種子を持ったことは、乾燥した陸地の奥深く進出するための決定的な要因であった。植物は種子を持つことによって、水への直接的な依存を断ち切ることに成功した。裸子植物はその最初のグループである。裸子植物の場合、シダ植物の精子にあたるのは花粉で、花粉は風によって雌花まで運ばれ、将来種子になる胚珠の中に花粉管を伸ばし、精核は卵核と結合する。ここでは、繁殖は水を直接的な媒体とすることなく行われる。また、種子は発芽前の乾燥といった厳しい自然条件にも耐えることができる。種子をつける樹木は沼沢地周辺だけでなく乾燥地や山岳地帯にしだいに侵入し、群落を形成するようになった。

恐竜が絶滅する少し前に、植物の世界にもう一つの大変革が起こった。それは被子植物が出現したことである。約1億年前に突然大量に現れた。裸子植物の場合、雌の生殖器官である胚珠が空気中にむき出しになっているのに対して、被子植物では、胚珠は花の付け根の子房の中に包み込まれている。裸子植物の種子は覆いを持たないので乾燥しやすいが、被子植物の種子は保護膜に幾重にも包まれ、気候の変化に対してはるかに耐性があった。被子植物がきわめて短期間に地球上いたるところに進出できたもう一つの理由は、花粉を運ぶ媒体として、昆虫や獣、鳥類の助力があったからである。

今から4億年前、水から陸に上がった植物は、進化を遂げながら、しだいに水辺から乾燥した内陸部へと生息領域を広げ、陸地を覆うに至った。植物が陸地に進出するとともに、植物に覆われた陸地の保水力は高まり、植物体を通して陸地からの水蒸気の蒸発量は増大していった。いわば、植物が乾燥した陸地に水を運んでいったのだ。そして、それが地球全体の気象-環境に大きな影響を及ぼしたことは疑いないことである。地表に緑が全くないころに比べて、気象ははるかに温和なものになった。

2.11 生物の大量絶滅¹⁾

過去、地球に生物が繁栄し始めたこの6億年の間に、およそ5回の大絶滅の時があった。

- (1) 4億4千万年前の海の無脊椎動物、三葉虫など57%の絶滅
- (2) 3億8千万年前の熱帯性サンゴ虫の絶滅
- (3) 2億5千万年前の海の生物の96%の絶滅
- (4) 2億1千万年前の海の生物の50%の絶滅
- (5) 6千5百万年前の恐竜を含む陸と海の生物の大量絶滅。

その一つ、今から6千5百万年前、直径10kmの巨大隕石が地球に衝突した。巨大隕石は、秒速30km

という猛烈な速度で大気圏に突入し、海に落ちた。轟音とともに爆発したこの巨大石質隕石は、衝撃によって高温、高圧となり、これによって溶かされ飛び散った粉塵は巨大隕石の重量の2倍、2兆tに達し、蒸気化した大量の海水が成層圏にまで運ばれていった。このときの津波は地球を半周した地点でさえも150mの高さがあったとされている。

粉塵と水蒸気、さらにその時付随して起きたであろう火災によるススにより太陽光線がほぼ完全にシャットアウトされた。このため、植物は枯れ、それを頼りに生きていた動物の多くは食料不足の中で死んでいった。また、陸上では氷点下の寒さにより、当時の多くの生物が死滅していった。数カ月たって、大気中の大量の水蒸気が豪雨となって大気中のススや粉塵を洗い落とし、暗黒の地球に太陽が顔を出すようになると、今度は、大気中に残っていた異常な量の水蒸気を引き金にして温室効果がおこり、地球の気温が上昇してついには平均気温が衝突前より10度も上昇したと考えられている。これは先の寒冷化よりもずっと長く続いたと考えられ、当時の地球の生物に致命的な影響を与えることになった。当時の動物と植物の種の75%が絶滅に追いやられ、体重25kg以上の陸上動物は一つとして生きのびられなかった。

恐竜の終焉の後に、ほ乳類が多様化し、爆発的に進化しており、生命の刷新が宇宙的事件の中で行われた。地球には、隕石や1年間に1万トンもの宇宙塵が今も襲来している。統計的には、地球の周辺には数多くの小惑星が接近してきており、それらがいつか地球に衝突することは間違いない現実である。それは、長い地球の時間の中で起きるものであるから、あまり悲観的になることでもないかもしれないが、地球で生まれた生物にとって、地球が宇宙の営みに組込まれている以上、生物もまた、宇宙の営みの影響をうけることになる。

2.12 氷河期¹⁾

氷河は雪の固まったものであるから、どんなに寒くなっても、雪が降らなければできない。水蒸気の供給があることが必要条件である。さらに氷床の成長には雪のアルベド（反射）が引き起こす増幅効果がある。涼しい夏が続くと、万年雪は少しずつ広がりを増し、いつしか夏の間も一面に万年雪に覆われるようになる。すると、雪が太陽の光のほとんどを反射するために、夏の日差しは大地を暖めることができなくなり、ますます寒く冷たい世界となっていく。海の水がまるでポンプでくみ上げられるように、雪となって降り積もるとき、万年雪は急速にその厚さを増す。やがて万年雪が氷に変わり、氷河となって流れだし、周囲に広がっていく。

氷河期には地球の陸地の3分の1が氷河に埋まっていた。しかも、氷河期が地球を襲ったのは一度だけではなく、最近の百万年の間にも7～8回の氷河期を経験してきた。最も現在に近い氷河期が始まったのは、11万5千年前で、その後10万年あまり続き、約1万年前に終わった。そして、地球は再び温暖な間氷期となり、それが現在まで続いている。その原因は、地球の運動のわずかな変化にあると考えられている。地球は、太陽や月、そしてほかの惑星から絶えず引力を受けている。その影響で、地球の軌道や地軸の傾きが、ゆっくりと変化している。例えば、地球の軌道は、約10万年の周期で円から楕円へと変わり、その間に地球と太陽の距離は1800万kmも変化する。また、地軸の傾きは、4万年の周期で21.5度から24.5度の間をいったりきたりしている。こうしたゆらぎは、地球の環境をさまざまに変化させ、生物の華やかな進化を生み出してきた。気候の変化は、まず植物に影響を与えその種類

を変化させる。それとともに、そこにすむ動物たちの種類も変わる。こうした変化の中で、新しい環境に適応する力を備えた新しい生物が出現し、古い生物に代わって繁栄する。生物の進化は、地球でこのように続いてきたのであり、地球のゆらぎこそ、生物進化の原動力であった。

2.13 人類の誕生と環境破壊¹⁾

人類が発生した3百万年前、その頃の人口は数千人ほどであったと推定されている。人類が農耕技術を発明し、安定した生活をするようになってから、人口は次第に増えるようになった。今から、9千年ほど前の人口はおよそ5百万人。西暦元年には2億5千万人と推定されている。そのころの年平均増加率は0.03~0.05%であった。しかし、その後、世界の人口は急速な上昇カーブを示すようになる。1750年に約8億、1800年に約9億、そして1850年には約10億となった。1950年に25億、そして現在約60億へと爆発的な人口増加が続いてきた。地球の歴史の中で、かつて大型動物がこれほどまでに増えた時はなかったといわれる。この人口圧が地球の生態系を壊し続けている。

人間は自分の行動を表現し、記録することによって、過去の行動を残し、次の世代へと伝えていく。知識と知恵は蓄積され、洗練され、文明は加速的に発展していくことになる。初期の人類は恵まれた自然の中を徘徊し、採取や狩猟によって食を得て生きていた。しかし、人口が増えるにつれて、自然の恵みは失われていく。人々はより自然の恵みの豊かな場所へと移動していかなければならなくなる。大型動物の多くは、人間によって殺され、その数は減少した。滅んでしまった動物の種も数多くあった。こうした状況の中で、一つの重大な発見があった。ある種の草の種が春になると芽を吹き、その芽は成長し、秋には何十倍もの実をつけることを知った。この自然のメカニズムを知った人々は、自然と同じ事を自分の手で試みてみた。農耕の始まりである。食料難に陥った人類は、農耕を始めることによってこの危機を回避することに成功したのである。

農耕はまさに人類の知恵の産物であった。農耕以前の人類は、自然の許容範囲の中でしか生きられなかった。食物を得られなければ他の動物と同じように滅びるしかなかったが、食物の蓄えによってそれを切り抜けることができる。そして、さらにもっと食物の生産を増やそうという工夫が始まる。この時から、人類の自然への積極的なかわりが始まったのである。穀物の食料生産のほかに、牛や山羊などの野生動物を飼育することも習得した。また、生活が野生から離れば、いろいろな道具が必要になってくる。土器や織物の生産の開始である。一つの知恵が次の知恵を生み出していった。食料生産と、身の回りの道具の生産を行うようになった人類は、他の動物に対して絶対優位の立場に立つことになった。その結果、人口は急増し、さらに知恵を働かせ、技術の向上をせまられていく。人類は、自然に対して積極的にかかわり始め、野生から抜け出ていった。

自然のほんの小さな変動、それが引き起こしたわずか2~3度の気温低下からくる大地の乾燥化が、当時の地球に生きる人類を大混乱に陥れた。しかし、この逆境の中で、人類の知恵が発揮され、輝かしい古代エジプト文明が誕生したのである。約1万年前、氷河期が終わったころの地球は比較的温暖な環境にあった。当時、サハラはサバンナの気候帯にあり、この地方の農耕開始に最適の環境となっていた。ところが、今から約4千5百年前、太陽と地球の位置関係が変わったため、北半球の気温が下がり、サハラのサバンナ気候帯では、雨の量が極端に少なくなり、乾燥化し、砂漠化が進んできた。緑が失われたサハラの大地から、人々は追われ、緑を求めてナイル川流域へと流浪していくことにな

る。ナイル川流域の人口は過密化し、パニック状態になったと考えられる。こうした人口問題を解消するために食料生産の増加が迫られた。そこで河川灌漑技術を発達させ、混乱を鎮めるための強力な国家が誕生した。

文明の繁栄には必然的に人口の増加が伴う。その人口を維持するために、人類は森林に火を入れ、樹木を伐採し、大地を耕し、食料生産を拡大させる。また肉食民族の場合は、牛や山羊などの放牧を盛んに行う。その結果緑が失われ、大地は荒廃し、ついには民族の衰退につながっていく。森林を切り拓き、耕作地と牧草地をつくったために大量の土砂が流され、その結果、食料生産が不可能となっていく。人間の活動による自然破壊によって地中海周辺地域は乾燥化し、半砂漠化していった。人類による環境破壊が地中海ほど拡大した地域はほかにはない。豊かな文明が築かれたその背後には、自然の大きな犠牲があったのだ。しかし、人類はこの自然の犠牲について、あまり理解しようとはしなかった。大地はあくまでも無限であると思いつけてきた。自然からの逆襲を強烈に受けていたにもかかわらず、人類はかけがえのない地球のシステムを壊し続け、その地域の環境が悪くなれば、場所をほかに変えていった。

地中海周辺の大地が荒廃化したとき、地中海文明はアルプスを越えてヨーロッパに侵入していった。今から千年前のヨーロッパは、ほとんど未開の地で、落葉広葉樹が茂る豊かな森の海であった。人々はこの豊かな森の中に斧を持って入り、原生林を切り拓いていった。この時、自然は人間のためにつくられたというキリスト教の考え方が大きな役割を果たした。森林開拓は徹底していた。原生林に火を放ち、空き地をつくってはそこに畑をつくり、羊や豚を持ち込み、またたく間に、樹海の海を開墾していった。そして約千年間、ヨーロッパ人は開墾に明け暮れ、肥沃な大地を耕し続けてきた。ヨーロッパ文明は、森林に火を放ち、そこに耕作地をつくり、放牧を行うという地中海文明と全く同じパターンで発展してきた。そして、18世紀後半には、ドイツでは森林が最も減少した。18世紀後半からイギリスで始まった産業革命は、ヨーロッパの人々を活性化し、農業主体の社会から工業化社会へと変換させていった。工業が盛んになり、木材の需要はますます高まっていった。それと同時に生活条件が改善されるにつれて、人口が急増した。人口が増加すると、それを養う食料や天然資源が不足してくる。ヨーロッパ大陸で人口がひしめき合い、あふれ出す事態へと向かっていった。しかしながら、アメリカ大陸が発見され、そこに人口を吸収させる道が開かれていたことで、ヨーロッパ文明は、自国の大地を地中海文明のように食いつぶす直前に救われたのである。

都市は余剰の集積されたものである。食料などの生産物やエネルギーの膨大な浪費を続ける一方で、都市はそれ自身では自立できない存在である。周辺部に、この浪費を支える生産力を持つ地域があつて初めて成り立つのである。資源の浪費は、都市文明の最初からの特徴であった。

しかし人口の増加は、余剰を余剰でなくしてしまう。生産の余剰を人口の過剰が食いつぶす。膨れ上がる人口に生産力が追いつかないという矛盾と危機。この矛盾が拡大し、やがて克服されていく過程が文明の歴史であった。しかし、都市の消費構造と周辺部をも含めた生産力とのギャップが著しくなり、限界状況を越えると、繁栄を謳歌していた大文明ですら、急速に凋落していく。世界のパンかごとしてのアメリカでも、連作や大型機械の導入、化学肥料や農薬の使用により、地力の低下が著しくなっている。

自然に働きかけて、適正以上の生産を引き出させる、自らの必要に合わせて自然を改変していく、

そうした性質を初期の段階で規定された文明は、その方向性を辿り続けている。人類は知恵を武器に幾つもの自然条件を克服してきたが、それは自らの存立基盤を食い尽くす知恵でもあった。自然に相対峙するために磨いてきた知恵の浅はかさの故に自滅するのか、その知恵を生かすことによって生き延びるのか、人類は今、重大な岐路に立っている。地球の資源も食料も決して無限ではなく、人類の活動によって環境が指数関数的に悪化していることを考えると、これまでの伝統的な成長至上主義的な生活様式には自ずから限界がある。人類と自然との調和のとれた付き合い方を遂行できるかどうかは、人類の能力の問題ではなく、意志の問題となってきた。

3. 環境先進国の取り組みと日本との対比

環境問題に対して、欧米では基本理念に基づいた野心的な政策が打ち出され、様々な取り組みがなされている。ヨーロッパの環境対策の先進国を実際に視察した河内は⁸⁾、欧州の国々と日本とを比較してその基本にある考え方の違いを指摘しながら、先進国の創造的な取り組みを紹介している。また、福永は⁹⁾、都市ゴミを主とした廃棄物処理技術に絞って、欧州各国の動向を紹介している。こうした欧米の新しい取り組みは、今後の日本の環境対策が進むべき点を明らかにするとともに、実際にこうしたことが実現できるのだということを実証している点で大いに価値のある取り組みといえる。以下に、河内の目を通して明らかにされた環境対策の先進国の具体的な取り組み、並びにそれらの対比によって指摘された日本の問題点について述べる⁸⁾。

3.1 デンマーク⁸⁾

大気・土壌・水汚染にかかわる全ての問題に対して、国民がいかに健康な生活ができるかを基本にした環境政策・対策がとられており、日本で問題とされるタテ割で省庁間の押しつけ合いや取り合い行政は基本的には見られない。廃棄物対策に対する基本的考え方は、(1) 廃棄物を生産段階から出さない、(2) 廃棄物として出たものは再利用するか再生する、(3) 再利用や再生できないものは焼却してエネルギーにする、(4) 燃やせないものは埋め立てる、(5) 最終的には埋め立てゼロを目指すというものである。石炭・石油の消費を削減し、二酸化炭素の排出量を減らすため、風力発電¹⁰⁾、バイオガス利用による発電と地域暖房、ゴミ発電、天然ガス利用など多面的なエネルギー政策を行っている。また、汚物対策として、バイオガス発生施設で家畜の糞尿や各種の有機物（屠殺場からの内蔵物、食品加工工場から出る廃棄物、魚類廃棄物、油粕、家庭生ゴミなど）を発酵させてメタンガスを発生させ、これを燃料としてエネルギーの有効利用をはかると共に、ガスを発生させたバイオマスの有機肥料としての肥料効果を高めている。一方、国内の飲料容器は、リターナブル瓶の使用が義務づけられ、高いデポジットによってほとんどが回収されている。自動車は高額な税金によって規制され、部品のリサイクルが普及している。さらに、製品に使用するプラスチックの種類を制限して安全性を高め、塩化ビニールの使用規制も実施している。

廃棄物を焼却する際には、焼却してはいけないものを徹底して分別し、焼却をクリーンに行う努力をしている。危険な化学物質の廃棄物は、自治体の出資によって設立された化学物質専門の処理会社で処理されている。ゴミ焼却炉の建設に際しては、住民とのトラブルをさけるため、(1) 住宅のな

い場所を選択し、(2) ダイオキシンの発生量が多い塩化ビニールの焼却を禁止し、(3) ゴミ焼却炉で得られた熱エネルギーを地域住民の暖房に使用し、(4) 公害放出に厳しいチェックを行い、(5) 専門家を含む自然環境団体による第三者チェックと自由な見学を受け入れ、住民の反対理由を十分に聞いて対応している。埋立処分場は危険ゴミと安全ゴミの中間物を埋め立てるものと位置づけられ、地下水汚染を考慮して海岸地帯に建設されている。さらに、焼却灰、アスベスト、建築廃材などはそれぞれ埋める場所を区分し、排水も分けて処理している。環境問題に国のトップクラスの専門家がボランティアでかわり、市民をリードしているため、データのごまかしや場当たりの対応がやれない状況がある。

廃棄物減量政策と税制は深く結び付けられており、廃棄物の焼却や埋め立てをする際に、自治体が廃棄物処理税という税金をとっている。この廃棄物処理税の3分の2は廃棄物発生源防止技術の促進や研究開発のために使われている。一方、企業に対しては、環境保全の立場からはっきりとした義務と責任が示されている。万一、企業が倒産して処理ができなくなれば、自治体の費用と責任で処理される。さらに、農業や化学肥料の大量使用による環境汚染を防ぐため、補助金制度を活用して有機農業を推進している。

3.2 ドイツ⁸⁾

基本的な考え方は、まず廃棄物になるようなものの回避を最優先とし、次にマテリアル(素材)リサイクル、それでも駄目な場合にサーマル(熱)リサイクルの順となっている。1996年10月に施行された「循環経済・廃棄物法」¹¹⁾では廃棄物を広くとらえ、使用済み製品及びそれを生産するときに出る全ての残余物も含めて廃棄物と規定し、事業者はその処理責任があるとしている。その結果、「廃自動車政令」によって、車メーカーと輸入元は、1998年4月以降に登録した車をすべて無料で引き取る義務を負うことになった。また、家庭ゴミの約50%が包装廃棄物で占められていたことから、ターゲットを容器包装材にしぼり、「包装廃棄物回避政令」を導入して、製造・流通・販売業者に全ての容器包装材の回収義務を負わせることになった。包装廃棄物の回収は、自治体の回収ルートと非営利会社DSD(Duales System Deutschland)による回収ルートの二元的なデュアルシステムによって行われており、DSD社は処理コストの負担料であるグリーンポイントの使用料で運営されている。

さらに、包装材の素材には環境を汚染せず、再利用ができることを求めている。このため、ペットボトルには高いデポジットをかけ、リターナブル瓶の使用を進めている。環境マークとしてブルーエンジェルマーク(Der Blaue Engel)が導入され、消費者が買い物の目安にすることで、環境負荷の少ない製品が製造されることを期待している。環境負荷を抑えることは企業の社会的責任であり、経済的にみてもコストを安くすることにつながるとして、企業が自ら回収・リサイクル・製品設計の改善を行う試みも始まっている。石油を使用しないエコロジカルな化学工業製品の商品開発を行う会社(アウロ社)が出現し、100種類以上の製品を販売しており、石油化学なしには現代生活は成り立たないという石油化学信仰に一石を投じている。この会社では、単に天然原料の研究と選別に力を注ぐだけでなく、原料の生産の仕方、廃棄物の取り扱いも含めて環境に対する厳しいチェックをしている。さらに、原料を栽培する人たちの生活への配慮も行い、原料の採取や栽培する地域の自然や生活が安定的に継続できるようにしている。

再生紙の使用率は60%程度になっており、政府・自治体、銀行、学校などの公的機関を中心にして使われている。さらに、教育の場でも、低学年の段階から環境教育がなされており、保護者や生徒を対象にした環境に対する手引書も整えられている。ヨーロッパの学校全般で見られるように、ドイツでも教師の授業に対する自由裁量度は大きく、様々な教材を使った環境教育が行われている。ドイツの環境政策が先進国の中でも進んでいるといわれるが、ドイツ政府の意識が特に最初から高かったわけではなく、市民の側から「経済成長優先から環境・自然優先」への要求が上げられて政治を動かした結果であり、市民が政治に対して環境教育を行って得られたものであることは、当局も認めている。環境教育は、行政だけでなく多くの環境保護団体や企業も積極的に行っている。

ドイツのゴミ処理に対する基本的な考え方は、ゴミの危険性で区分されており、産業廃棄物か一般廃棄物かという区別はない。廃棄物中の有害物の有無が処理規準とされており、そのランク分けで処分場が変わるし、処理価格にも差がでる。捨てるもの（保管するもの）を品目に分けて埋め立てており、焼却処理によって生じたEP灰（フィルターでの集塵灰）は、万全を期して、地下500～1000mの岩塩層の保管場所で一時保管されている。法律でゴミ処理の排出責任が明記されており、ゴミを出す側と処理する会社がそれぞれに監督官庁にゴミ処理記録報告書（マニフェスト）を出し、両方の書類の照合により当局が不正をチェックしている。この2重のマニフェストと形式的でない公共の関与によって不法投棄を防いでいる。家庭でのゴミの焼却は、法律で禁止されている。包装廃棄物回避政令が導入されたことで、包装ゴミが減少し、包装の簡略化や不要な包装の80%が無くなった。さらに、堆肥プラントによる生ゴミの堆肥化も順調に進んでおり、ゴミ減量に寄与している。現在では、ゴミ減量効果が予想以上に上がってゴミが集まらず、採算割れして閉鎖している焼却施設が出るほどになっている。

水道の水源には地下水（50～60%）、伏流水（10%）、湖の水（30～40%）を利用しており、現在の塩素消毒を、将来、紫外線による殺菌に切り換える計画が進んでいる。また、集約農業による肥料と農薬に由来する地下水汚染が心配されているため、農業は汚染源であるとともに環境保護のためのパートナーでもあるという共存の立場を明確にしながら、地下水汚染を避ける意識的な努力が行われている。埋立地の覆土用の土は、各家庭の地下室を造るときに掘り出した土を利用している。景観も資源の一つという価値観にもとづいて、景観も元に戻すことを考えて、埋め立てを行っている。

酸性雨の被害は、まず樹木の葉の炭酸同化作用を低下させ、葉の気孔の開閉作用を阻害する。また土壌を酸性化して植物の栄養分を流失させ、アルミニウムイオンを遊離させて植物の根を傷つけて被害を及ぼす。弱った樹木は虫や菌類の寄生を受けやすくなり枯死する。ドイツ全土の森林の64%に多少とも被害がでており、24%が重症となっている。このため、石灰の土壌散布が行われている。さらに、公共交通機関や自転車の使用を奨励したエコシティづくりの努力も行われている。また、熱効率と二酸化炭素の排出量から見ると、電気よりもガスの方が良いため、家庭のガスレンジ購入に補助金を出してガスの普及を進めている。一方、発電と廃熱を利用した給湯・冷暖房を行うコージェネレーションシステムでは、エネルギー効率を70～80%まで高めることができ、消費地域に結びついて発電されるため送電線も不要となり、エネルギー燃料はゴミも含めてなんでも利用できるという強みを持っている。このため、埋立処分場から発生するメタンガスも、発電と廃熱利用のコージェネレーション発電用エネルギーとして利用され始めている。

3.3 日本⁸⁾

日本は、自動車の排ガス対策、工場の排ガス対策、省エネと環境対策において世界をリードしている。しかし、日本の環境対策は、産業界の自主性を期待するという限界をもち、ビジネスとして技術開発され進められてきたハードウェアを中心としたものになっている。技術開発自体は、それなりの価値を持つが、トータルな環境対策のなかで出てきたことではないので、その技術が多面的に政策を通して生かされていない。なぜ環境を守らなくてはならないのか、そのための新しい価値観・制度・技術はいかにあるべきかという観点からの一貫性をもつことができないでいる。さらに、市民の側からの政治に対する環境教育が弱い。このため、日本のゴミ処理記録報告書（マニフェスト）は6品目の特別管理廃棄物だけで、しかも、監督官庁が特別管理産業廃棄物管理表（管理表）、承諾書とも監査を行っておらず、企業の自主取り組みなどになっているため、不法投棄の温床となっている。多くの自治体では、EP灰（フィルターでの集塵灰）も含めてなにも処理せずに他のゴミと一緒に埋立処分場に埋め立てている。外国のことはよそ事という外の状況に疎い国民性を持っているため、例えば、環境に優しい洗剤をつくるために、熱帯雨林を切り開いてつくられたプランテーションから供給される植物油脂を原料にしているという問題点が忘れ去られがちである。

産業活動の発展と拡大が永遠に繰り返されないと豊かな生活が得られないという前提でものごとが進められており、日本のメーカーの現状もいまだにいかに早く買い換えさせるかという段階にとどまっている¹²⁾。廃棄物減量の基本的な順番である、まず発生量の削減、ついで再使用、再生利用であることが、政策の中に生かされておらず、環境関連の産業育成も、進め方によっては持続可能な社会の発展と異なる恐れを持っている。家電リサイクル法は廃棄家電製品の回収とリサイクルの費用を使用者である消費者が負担することを基本的な考え方としているが、これにより、不法投棄が増加する可能性が指摘されているとともに、メーカーに製品製造時にリサイクルし易い製品設計をする動機づけが与えられていない。さらに、パソコン、電話などの情報通信機器が考慮されていないという問題がある。また、当面の対策として注目されているゴミの固形燃料（Refuse Derived Fuel、RDF）化¹³⁾による発電は、ゴミが減少することを目指すものではなく、継続的に燃料となるゴミがないと成立しない面を持っている。

家庭から出るゴミのうち、生ゴミは湿重量比で約50%、乾重量比では約20%を占めており、日本で生ゴミを焼却しないでバイオガス施設で処理できれば大幅なゴミ減量がかかれる。日本の産業廃棄物の中で、家畜の糞尿（7千7百万トン）は量的には第2位を占めており、この糞尿に含まれる肥料の三要素の窒素、リン、カリの総量を推計すると、日本の全耕地で必要とされる肥料を上回ると試算されている。また、この家畜の糞尿処理をバイオガス発生と組み合わせると、東北と北海道を合わせた年間使用電力量に匹敵する発電量が得られることになる。全国でバキュームカーで集められ海洋投棄される人間のし尿からも多量のバイオガスが得られる可能性がある。

4. 日本における廃棄物問題

酒井¹⁴⁾や市橋¹⁵⁾が指摘しているように、現在、日本で発生する一般廃棄物（家庭を中心に排出されるゴミ）は年間約5千万t（表1）で、1日1人当たりの平均ゴミ排出量は約1.1kgである。一方、産業

廃棄物の発生量は1993年で約4億トンに達し、汚泥が45%と最も多く、動物の糞尿19%、建設廃材15%と続いている。産業廃棄物では、発生総量の約40%が再生利用され、最終処分量は約20%の8千万トンとなっている。ただし、いろいろな化学物質に関連が深いことから、化学物質汚染が懸念される廃棄物も多い。万一、有害廃棄物（有害物質を含む廃棄物）による環境汚染が発生した場合には、修復に莫大なコストと社会的エネルギーを要するため、有害廃棄物の処理技術や汚染跡地の修復技術の開発とともに、有害廃棄物の不法投棄、不適正処分による環境汚染を未然に防止する体系を確立することが不可欠となっている。

日々発生する廃棄物の問題は、フローとしての質的・量的問題が中心である。しかしながら、日本の全体の物質収支をながめると（図1）、年間12億tを越える蓄積がなされており、これまで社会が蓄積してきたストックとしての物質の廃棄問題が、今後より大きな問題として顕在化してくる^{14),15)}。例えば、1995年1月17日の阪神淡路大震災で顕在化した社会ストックの廃棄問題としては、倒壊家屋の解体により、100m²の家屋で100tの廃棄物が発生したことである¹⁴⁾。これは、3人家族が1年間に排出するゴミの約百年分に相当しており、100m²の家屋で発生する100tの廃棄物は、たとえ災害がなくても、再利用に努力しない限り、解体時にはいずれ発生する廃棄物である。また、地震や水害などの災害により顕在化する廃棄物問題としては、その他に、保管廃棄物の流出、生活基盤の損傷に由来して発生する廃棄物問題などがある。

4.1 都市ゴミのリサイクルの現状

古紙、アルミ・スチール缶、ガラス瓶（図2）は比較的リサイクルをはかりやすいものの、分別された物の品質や回収品の需給変動によってリサイクル率が大きく左右されやすいものでもある。廃棄物排出者の個々人のもつ価値観や行動のわずかなゆらぎにより、分別回収されリサイクルに回るか、混合排出されゴミとして処理されるか、簡単に変化する。まず、日本におけるこれらのリサイクルの現状と課題を見てみることにする。

4.1.1 古紙¹⁴⁾

日本の紙生産量は1992年で2千8百万トン。新聞紙、段ボール古紙の回収率は約80%。古紙利用率は段ボールなどの板紙では86%と高いものの、印刷用紙などの上質紙では低く、古紙利用率の低い分野において古紙利用率を上げることが課題である。

4.1.2 アルミ・スチール缶¹⁴⁾

アルミの再生地金の生産に必要なエネルギーは新地金生産のわずか3%に過ぎないため、アルミのリサイクルが効率的であるとのイメージが定着している。1994年のアルミ缶のリサイクル率は61%、スチール缶のリサイクル率は70%。リサイクル率は上昇しているにもかかわらず、飲料容器の消費量が大きく増加している点が問題となっている。

4.1.3 ガラス瓶¹⁴⁾

1994年のカレット（割れガラス）のリサイクル率は56%。一方、1990年に生産されたガラス瓶は240万t、100億本で、重量比でワンウェイ（使い捨て）瓶が75%、リターナブル（再使用）瓶が25%である。注目すべきは、1.8リットル酒瓶の回収率が83%、ビール瓶では97%と極めて高いことで、他の製品容器にもよりいっそうリターナブル瓶を普及することが期待されている。

4.1.4 カセットボンベ、スプレー缶¹⁴⁾

リサイクルシステムが整備されていないため、廃棄物の収集・運搬、処理の段階で、残留ガスの漏れだしにより多くの死傷事故を引き起こしている。1993年には約6億4千万本のスプレー缶が生産されている。スプレー缶の噴射剤には1980年代までフロンが多用されていたが、オゾン層保護のため、再びプロパンガスなどの液化ガスが用いられるようになっている。カセット式小型ボンベは、1993年に約5千5百万本生産されている。可燃ガスを用いたスプレー缶やカセットボンベの回収体制は確立されておらず、大半が廃棄物の流れに入っている。しかも、家庭ゴミとして出されるもののうち、穴をあけて出されているのは半数である。使い切りや穴あけの徹底を呼びかけるという当面の対策もさることながら、危険で有害物を持つ製品は、本来循環を前提にした販売がなされるべきである。また、スプレー缶では、そもそも高圧スプレーが必要かどうか問い直す必要がある。

4.2 有害廃棄物¹⁴⁾

1989年採択、1992年発効の「バーゼル条約」では、人の健康や環境に影響を及ぼす可能性のある廃棄物をコントロール下におくため、有害廃棄物を、特定の廃棄経路から排出されたり（Y1～Y18の18経路）、特定成分を含み（Y19～Y45の27種類）、危険性と毒性の有害特性（H1～H13）を示すものと定義している。有害廃棄物の越境移動は原則として制限しているものの、回収目的の有害廃棄物については一定のルールのもとに越境移動を認めている。

有害廃棄物の管理を考える場合、その有害性の保存・非保存によって分類される保存性物質（重金属類）と非保存性物質（化合物）では本質的な違いがある。保存性物質である重金属を含んだ廃棄物の場合、絶対的な無害化の方法はなく、最終的には安定化（固化法を含む）にゆだねることとなる。それ故、その前段の発生回避、リサイクルが重要となる。一方、非保存性物質は、適正な分解条件であれば分解処理は可能である。しかしながら、環境に拡散した場合には、地球規模での物質移動、生物濃縮がおり、生体への影響が懸念される。このため、化学物質の生産から使用・循環・廃棄の全工程を見通した管理が重要となる。特に、残留性、生物濃縮性、揮散移動性、毒性の4大特性を持つ残留性有機汚染物質（Persistent Organic Pollutants, POPs）¹⁶⁾については、因果関係に完全な科学的立証がない場合でも、環境に悪影響を与える可能性がある場合には対策を講じるという「予防原則」を適用すべきである。廃棄物の溶出試験は、本来、水環境を通じた物質移動を把握するためのものであるが、その他にも、溶出液中の有害物質の濃度を規準値と比べることによって、有害廃棄物として取り扱うか否かを判定する目的にも使われている。この溶出試験法として、日本では環境庁による告示第13号の方法、米国環境保護庁によるTCLP法（Toxicity Characteristic Leaching Procedure）がある。

4.2.1 保存性物質

4.2.1.1 鉛・カドミウム (図3) ¹⁴⁾

廃蓄電池からの鉛の再生利用はリサイクル率が高い。ただし、鉛価格が市況に影響されるため、再生鉛価格が低迷する場合には廃蓄電池のリサイクルルートが滞る。また、技術的な問題から、再生鉛への需要が縮小しており、市中に鉛が滞留する可能性が高くなっている。一般の製品群に広く薄く使われた鉛のリサイクルは非常に難しい。回収システムが十分でなく、大半が廃棄物として排出されていると考えられる。無機薬品では、塗料、プラスチック安定剤、ブラウン管、クリスタルガラス、陶磁器の釉薬などとして使用されている。プリント基板などのハンダも廃棄物化する可能性が高い。廃棄物の焼却処理によって、鉛やカドミウムは焼却残渣に濃縮され、その溶出性は高い。現在最終処分場に移行している量は、一年間に鉛8千5百t、カドミウム220tと推定される。鉛とカドミウムの可採年数がそれぞれ約20年と約60年であることを考えると、無視できない量である。

4.2.2 非保存性物質¹⁴⁾

商業生産されている化学物質は約10万種類にもものぼる。最近懸念されているのが、外因性内分泌攪乱化学物質、あるいは環境ホルモンと言われている化学物質と生殖機能、免疫機能などへの影響である¹⁷⁾。こうした化学物質が、感受性の高い生命の発生期、胎児期、小児期に強く作用するものであるなら、20~40年遅れでその影響が現れてくることになる。外因性内分泌攪乱化学物質として認められている代表的な物質には次のようなものがある。(1) アルキルフェノール (Alkylphenol) : 洗剤、塗料、除草剤、化粧品などに使われている界面活性剤アルキルフェノールポリエトキシレート (Alkylphenol Polyethoxylate, APE) が微生物によって分解されて生成する。(2) ビスフェノールA (Bisphenol A) : ポリカーボネート樹脂、エポキシ樹脂などの原料として使われている。(3) フタル酸エステル (Phthalic Acid Ester) : さまざまなプラスチックの可塑剤として広く使われている。(4) 有機塩素系化合物 : 有機塩素系農薬、PCB、ダイオキシン類などの有機塩素系化合物。

4.2.2.1 ダイオキシン類

最近の国民的な関心事となっているダイオキシン問題は、廃棄物の処理を考える上で避けて通れない問題となっている。日本全国に数多くの焼却施設が存在すること、日常生活からでる一般廃棄物の焼却過程でダイオキシンが生成すること、ひとりひとりが日々廃棄物を排出する立場にあること、さらには普段の食事から取り込んでいることなどから、ダイオキシン問題はより身近な問題として皆の関心が集まっている。しかしながら、ダイオキシンは現代社会が直面している有害物質の中のごく一部であり、商業生産されている約10万種にもものぼる化学物質の中にも、有害物質であるものや、あるいは有害物質に変化するものが数多く存在する。このため、ダイオキシンだけが全てではないことをまず明確にしておく必要がある。

産業革命以前にも、森林火災など自然由来のダイオキシンは存在していたが、特に20世紀の塩素の産業利用拡大の中で、地球規模でのダイオキシンの蓄積量増加が見られる。特に、日本では、都市ゴミ焼却で約1800もの施設、さらにその数を大きく上回る産業廃棄物焼却施設と小型焼却施設の存在がある。全国に散在する民間の産業廃棄物処理施設からのダイオキシンの生成・排出の実態はほとんど明らかにされていないため不明な点も多いが、産業用に使用されている塩素含有プラスチックが多い

日本で、産業廃棄物処理施設からの発生量が小さいとは考えられない。さらに、焼却施設から排出されるダイオキシン類は、大気中に排出されるもののほかに、最終廃棄物と呼ばれている焼却残渣の中にも大量に含まれている。このため、ダイオキシン類の列島総汚染ともいべき状況が生じており、大量生産、大量消費、大量廃棄という経済活動のあり方がこれに拍車を掛けている。日本における環境中のダイオキシン濃度は、他の先進国と比べて一桁高いと言われており¹⁸⁾、事態は待ったなしで、国民、産業界、行政をあげてのダイオキシン削減対策が必要とされている。

ダイオキシン問題についてその問題点と解決法が明らかされることにより、他の環境汚染有害物質に対する有効な対処法、並びに産業廃棄物を含む廃棄物問題全体の解決法が見えてくるものと考えられる。このため、環境修復・保全技術の開発を模索するものにとっては、ダイオキシン問題は有効な切り口である。そこで、ダイオキシン類に関しては、幾分詳細に述べることにする。

[1] ダイオキシン類の定義と特性 (図4) ^{14),16),18)}

ダイオキシンはポリ塩化ジベンゾパラジオキシン (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs) の略語で、塩素置換数や塩素置換位置の違いによって一塩化から八塩化まで8種の同族体、合計75種の異性体が存在する。一方、ダイオキシン類は、類似の性質と毒性を持っている、75種の異性体があるダイオキシン、8種の同族体、135種の異性体があるポリ塩化ジベンゾフラン (Polychlorinated dibenzofurans, PCDFs)、及び4種の同族体、13種の異性体があるコプラナーPCB (Coplanar Polychlorinated biphenyls, Co-PCBs) の総称である。したがって、ダイオキシン類に分類されるものは、全部で223種 (=75+135+13) の異性体がある。PCBについては、オルト位といわれる2、2'、6及び6'の位置に塩素原子を持たない異性体は、二つのベンゼン環が同一平面に位置するためコプラナーPCBと呼ばれている。コプラナー以外のPCB異性体はオルト位に塩素原子が1～4個入っており、オルト位の塩素数が増えるにつれて二つのベンゼン環の位置関係が変化し、4個になると二つのベンゼン環が垂直になる。当初、ノンオルトコプラナーPCBのみが、コプラナーPCBと言われていたが、ノンオルトと同じ基本構造をしながらも、オルト位に塩素原子が一つ入っているモノオルトコプラナーPCBと二つ入っているジオルトコプラナーPCBも同じ生体作用をすることが明らかとなったため、これらも含めてコプラナーPCBと呼ばれている。

ダイオキシン類は常温では白色固体で、融点は高く、水にはほとんど溶けない。また、蒸気圧も低く、常温では気体になって蒸散する量は極めて少ない。熱にも強く、2,3,7,8-四塩化ダイオキシンは750℃以上の高温でないと分解しない。酸や常温のアルカリにも分解されにくい。ただし、熱アルカリ溶液中では、塩素化の高いダイオキシンとポリ塩化ジベンゾフランは容易に脱塩素化されて分解が起こる。ダイオキシン類は、環境中の微生物ではほとんど生分解されず、環境中で主として光で分解されるものの分解速度は遅い。ダイオキシン類は脂肪には良く溶け、人間でも体内に取り込まれたダイオキシン類は主に脂肪組織に蓄積する。また有機溶媒にも良く溶け、脂溶性を表すオクタノール/水分係数 (Kow) はほぼ6～9の範囲にある。この脂肪に溶けやすいという性質は、人間をはじめとする動物の体に蓄積されやすい結果を引き起こす。

[2] ダイオキシン類の毒性^{16),17)}

ダイオキシン類の毒性は遅延性の致死性で、体内摂取後に体重がどんどん減って行き死に至る、消耗性疾患といわれる毒性を示す。ダイオキシン類の致死毒性は動物の種類や系統の違いによって大きな差が見られる。動物間の感受性は、モルモットが最も高く、ミンク、サル、ラット～マウス～ウサギ、ハムスターの順で感受性が低くなっている。モルモットに対する半致死量からみた2,3,7,8-TCDDの毒性はサリンの10倍、青酸カリの1万倍も強い(表2)¹⁹⁾。また、ラットやマウスに対する半致死量からみた2,3,7,8-TCDDの急性毒性は青酸カリの1000倍も強い¹⁴⁾。一方、ダイオキシン類を一生涯にわたって摂取することで現れる慢性毒性の生体への影響としては、発ガン性、体重減少、免疫抑制、造血機能低下、タンパク合成や脂質代謝機能の低下、肝臓障害、生殖障害、ホルモン攪乱障害などがある。

ダイオキシン類の高濃度汚染が発生した歴史的イベントについては、宮田¹⁸⁾がその原因やその後の経過も含めてまとめている。ここでは、ダイオキシン類による高濃度汚染の影響を理解するため、これらの歴史的イベントについて簡単に述べる。

(1) 1957年、米国東部と中西部で数百万羽のヒヨコが肺のう水腫で死亡¹⁸⁾

微量のダイオキシンによって汚染されていた植物油と動物油脂を配合した飼料が原因で、数百万羽のヒヨコが肺のう水腫で死亡した。原料の大豆生産時に散布された除草剤2,4,5-三塩化フェノキシ酢酸(2,4,5-Trichlorophenoxyacetic Acid, T)に含まれていた微量の不純物2,3,7,8-四塩化ダイオキシンが、植物油に混入。また、毛皮をなめす際使われた腐敗防止剤の五塩化フェノール(Pentachlorophenol)に含まれていた微量の不純物、六塩化から八塩化のダイオキシンが、毛皮をなめした後に回収された動物油脂に混入した。

(2) 1967年、ヒトの近縁種であるアカゲザルでダイオキシンの生体毒性を実証¹⁸⁾

アカゲザルという人間の近縁の種でダイオキシンの生体毒性が実証された。アカゲザルでは、死亡以外に、全身性の浮腫、造血機能や造精機能の減退、胃粘膜の肥厚と胃潰瘍などの所見が認められた。

(3) 1961年～1971年、ベトナム戦争での米軍による「枯葉作戦」¹⁸⁾

作戦遂行の障害となるジャングルを消失させるため散布された2,4,5-三塩化フェノキシ酢酸(2,4,5-T)主体の枯葉剤に微量の不純物として2,3,7,8-四塩化ダイオキシンが含まれていた。10年間で南ベトナムに散布された枯葉剤の総量は6万7千キロリットル、散布面積は131万ha以上に及び、南ベトナムの内陸部森林の12%、マングローブ森林の40%、耕作地面積の5%以上が壊滅した。この枯葉剤散布で、ベトナム人だけでなく従軍した兵士にもさまざまな生体被害が現れている。

(4) 1968年、カネミ油症事件¹⁸⁾

カネミ倉庫製油会社が製造した米ぬか油に、熱媒体として使われていたPCB製品が、脱臭装置改修工事の際の不備により、循環パイプの接続部から漏出して混入した。この中に、コプラナーPCBやPCBの熱変成でできたポリ塩化ジベンゾフランが含まれていた。油症患者には、さまざまな生体被害が現れている。

(5) 1971年、ミズーリ州の汚染事故¹⁸⁾

廃油処理業者が馬術ショーのグラウンドの土ぼこりを抑えるため散布した7.6klの廃油に、微量の2,3,7,8-四塩化ダイオキシン(330 µg/ml)を含む2,4,5-三塩化フェノール(除草剤の原料、2,4,5-

Trichlorophenol) 製造工場のプラント廃液が廃油の増量剤として混合されていた。野鳥、昆虫、馬に甚大な死亡例が出た。人にも生体被害が現れている。

(6) 放置されている除草剤¹⁸⁾

2,4,5-三塩化フェノキシ酢酸 (2,4,5-T) や2,4,5-三塩化フェノールのプラント残渣を埋めた産業廃棄物埋立地が米国で約一万カ所、日本でも全国に27 t分が埋立られている。

(7) 1976年、セベソ事故¹⁸⁾

イタリアのミラノ市北部のギボーダン社のイクサメ工場で、2,4,5-三塩化フェノール製造プラントが暴走し、安全弁から2.9tと推定される反応物が放出された。この中に、250~300gと推測される2,3,7,8-四塩化ダイオキシンが含まれていた。安全弁から放出された反応物は白い雲状となり、風によってセベソ町を中心とした幅700m、長さ2kmの細長い地域に白雲が降り注いだ。白雲が降下した地域の草は、16万ng/gもの高濃度の2,3,7,8-四塩化ダイオキシンで汚染されていた。このような大事故にもかかわらず、事故の概要が公式発表されたのは事故発生後の5日目で、工場担当者や地元の当局がなんの緊急措置もとらなかったことが、その後の被害を一層ひどくする結果となった。事故2日目には、子どもに症状が現れ、3日目からは、動物の死や植物の枯死が始まった。その後、汚染の程度によって三区別された汚染マップがつくられ、最も汚染がひどい地帯では、住民の強制疎開、10年間の居住禁止を含む措置がとられた。また、汚染地帯で飼われていた家畜の食用が禁じられ、そのほとんどが殺処分された。

(8) 化学工場における汚染事故¹⁸⁾

ここ50年の間に、世界各地の2,4,5-三塩化フェノールの製造工場、または2,4,5-三塩化フェノールから除草剤の2,4,5-三塩化フェノキシ酢酸 (2,4,5-T) を製造する工場で、副生成物の2,3,7,8-四塩化ダイオキシンによる汚染事故が約20回も起こっている。特に、職業的汚染者の場合は慢性的に被曝することになる。

(9) 1978~1979年、台湾の油症事件¹⁸⁾

カネミ油症と全く同じ様に、熱媒体として使われていたPCB製品が脱臭工程中の米ぬか油に漏出混入した。患者数は、カネミ油症とほぼ同規模の約2000人。

[3] ダイオキシン類の毒性の評価法^{14),18)}

ダイオキシン類の異性体の毒性を評価するため、一番毒性の強い2,3,7,8-四塩化ダイオキシン (2,3,7,8-TCDD) の毒性に換算する方法がとられている。このため、2,3,7,8-TCDDの毒性を1としたときの相対的な毒性の強さを表す2,3,7,8-四塩化ダイオキシン毒性等価係数 (2,3,7,8-TCDD Toxicity Equivalency Factor, TEF) が用いられる。ダイオキシン類の中で、毒性等価係数が決まったダイオキシンの異性体は7種類、ポリ塩化ジベンゾフランの異性体は10種類、コプラナーPCBの異性体は13種類、合計30種類で、他の異性体の毒性はゼロという訳ではなく係数が決まっていただけである。実際のダイオキシン類の環境影響を判定する際には、各異性体の実測濃度に2,3,7,8-四塩化ダイオキシン毒性等価係数を掛けて総計をとることで求めた2,3,7,8-四塩化ダイオキシン毒性等価量 (2,3,7,8-TCDD Toxicity Equivalency Quantity, TEQ) を導入することで、数多くの異性体を含む様々な試料の毒性を総合的に判断している。

[4] ダイオキシン類の摂取量¹⁸⁾

摂取量の判断指標として、耐容1日摂取量 (Tolerable Daily Intake, TDI) が用いられる。各国で採用されているTDI値を表3に示しているが、これらの値は将来より低い値に改訂される方向にある^{16),18)}。日本人が毎日摂取しているダイオキシン類 (PCDD+PCDF) の総摂取量 (表4) は、1日に体重1kg当たり3.68pg-TEQとなるが、これにコプラナーPCBの摂取分とされる8.73pg-TEQを加算すると、耐容1日摂取量の10pgを超えてしまう。日本のコプラナーPCBによる環境汚染のレベルは高く、影響評価にはコプラナーPCBが最も問題となる。ダイオキシン類の摂取割合から見ると、食事からの摂取が圧倒的に多く、大気からは1.5%と小さい。しかしながら、大気中のダイオキシン類の大部分は浮遊粉塵の表面に付着して大気中を漂っていて、呼吸で吸い込まれると粉塵とともに長期間、肺に蓄積する。大気粉塵の中には、発ガン性のあるニッケル、クロムなどの金属、ベンツピレン (Benzopyrene) で代表される多環芳香族炭化水素、ニトロ化芳香族炭化水素などが含まれているため、ダイオキシン類の発ガン増強作用による協力的作用が懸念され、摂取割合だけでなく、作用力の違いを考慮する必要がある。

大阪地帯において調べられた食物経由のダイオキシン類 (PCDD+PCDF) の平均1日摂取量* (表5) を見ると、ダイオキシン類の60%を魚介類から摂取しており、日本人が魚介類を多食するという食習慣が反映されている。さらに、日本では、食事経由で摂取するコプラナーPCBの量が1日436pg**と、ダイオキシン類 (PCDD+PCDF) の2.5倍もある。コプラナーPCBの摂取の主な内訳は、魚介類57%、肉・卵類21%、牛乳・乳製品10%、米以外の加工品・芋類が7%となっている。ちなみに、市販されている日本の近海魚のダイオキシン類 (PCDD+PCDF) による汚染は輸入魚よりも10倍高く、また、コプラナーPCBがダイオキシンやポリ塩化ジベンゾフランよりも水溶性が高く、生体濃縮が大きいことから、生物の体内に取り込まれ易いため、沿岸魚ではコプラナーPCBの汚染度が高くなっている。

人の体内に入ったダイオキシン類は肝臓で代謝され、毒性の低い異性体のほとんどは体外に排出されてしまうが、残りの毒性の強い異性体がすべての臓器や組織に分布・蓄積される。とりわけ皮下脂肪や腸管膜脂肪などの脂肪含有量の多い組織や、肝臓、卵巣にも多く蓄積する。ただし、蓄積されたダイオキシン類はその場所に留まっているのではなく、絶えず血液によって輸送され、他の臓器や組織に再分布・蓄積する。その一部のダイオキシン類は、肝臓から胆嚢を経由して胆汁とともに排出され、小腸で再び吸収されて肝臓に戻るといった「腸肝循環」を繰り返している。この循環を繰り返しているダイオキシン類は、食物繊維や葉緑素によって小腸内で吸着され、大便とともに排出されるた

*トータルダイエット・マーケット・バスケット方式によって調べられた。この方式は、国民栄養摂取量調査表に基づいて、食品を市場で購入し、各食品の摂取形態に応じてそのまま、あるいは調理をする。これらを13の食事群に分類し、各食品の摂取量に応じて各食事群ごとに混合したものを分析試料とする方法で、その地域の平均的摂取量を調査するためには最も優れた方法である。これに対して、各家庭で一人分の食事を余分に作り、それを分析試料とする陰膳方式では、家庭の食事の嗜好傾向を大きく反映し、各個人の摂取量を評価するには優れているが、その地域の平均的摂取量を調査するには不適切である。

**50kg x 8.72pg-TEQ/kg/日=436pg/日

め、体内に蓄積したダイオキシン類を効果的に体外に排出するには、食物繊維や葉緑素を多く摂取するのが効果的である。生体内での生物学的半減期は異性体によって異なるものの、きわめて長く、血液中で4~11年、脂肪組織中で3~10年になる。母乳は体内に溜まった毒性物質を排泄する作用があることから、女性が一人子どもを出産し、約1年間母乳を飲ませると、ダイオキシン類の約60%が乳児に移行することになる。

[5] ダイオキシン類の生成過程^{14),16),18)}

ダイオキシン類の主要な生成過程として、次の4つが明らかになっている：(1) 塩化フェノールとそれを原料とする殺菌剤、枯葉剤の製造による生成、(2) PCBの製造と燃焼による生成、(3) 塩素を含む製品の燃焼による生成、(4) 塩素殺菌や塩素漂白の過程での生成。さらに、宮田¹⁸⁾は、調べたダイオキシン類による汚染パターンを、(1) 燃焼によるもの、(2) 紙・パルプなどの塩素漂白によるもの、(3) 除草剤や殺菌剤などの農薬によるものの3つに大別している。燃焼パターンでは、理論的に考えられるすべての異性体が混在しているが、漂白パターンでは、限られた数の異性体が生成し、2,3,7,8-四塩化ダイオキシンや2,3,7,8-四塩化ジベンゾフランが主成分となっている。

日本のゴミの焼却量をみると、米国の1.3倍、ドイツの4倍と先進国の中でもトップで、焼却炉の数も多く、しかも小・中規模焼却炉が約80%を占めているという特徴がある。ダイオキシン類は不完全燃焼が起こるときに生成しやすくなるため、間欠運転を行う炉の場合、ゴミが燃えている定常状態に比べて、ゴミ焼却開始（たち上げ）時、燃焼停止（たち下げ）時、あるいは燃え残りがくすぶっている（埋火）時に排ガス中のダイオキシン類の生成濃度が高くなる。また、小規模焼却炉ほど排ガス処理設備はつけられていないため、定常状態でも排ガス中のダイオキシン類の生成濃度は高くなっている。また、焼却残渣として残る焼却灰には平均0.3ng-TEQ/g（表6）、飛灰には平均15ng-TEQ/g（表7）のダイオキシン類が含まれており、総量的には、焼却残渣に含まれるダイオキシンは、排出総量の70~80%を占めている。

燃焼によるダイオキシンの主な生成機構は、(1) 塩化フェノール、塩化ベンゼンなどの前駆物質を経由した反応、並びに(2) 銅や鉄など金属触媒下での固相炭素源と塩素源による新規合成反応（デ・ノボ合成）によるものであるが、いずれの生成機構が主になるとしても、塩素が全くなければダイオキシンは生成しない。ただし、酒井^{14),16)}は、都市ゴミからポリ塩化ビニル（PVC）を除去することがダイオキシン抑制に効果があるかという論争は、いまだに結論が出ていない問題であるとしている。図5は、いろいろな有機物が燃える過程でダイオキシン類が発生する仕組みを模式的に示したものである。有機物が燃えるとベンゼン環ができ、そこに塩素がくっつくと塩化ベンゼンができ、塩化ベンゼンが2個くっついてPCBができ、さらにポリ塩化ジベンゾフランができる。一方、塩化ベンゼンが酸化されることによって塩化フェノール（Chlorophenol）ができ、ダイオキシンが生成される。塩化ジフェニルエーテルのように真ん中に酸素が入っても、ポリ塩化ジベンゾフランができる。身の回りの化学工業製品には、塩素が豊富に含まれているため、それらがゴミとなって燃やされると、結果的にダイオキシン類の起源物質である塩化ベンゼンができてしまう。ものが加熱されたり燃えたりすると合成反応と分解反応が同時に、瞬間的に起こる。

酸素を十分入れながら、850~900℃で燃やすと、ベンゼンや有機物などは分解して、最終的には炭

酸ガス、水、塩化水素になり、ダイオキシン類はほとんど発生しない。燃焼温度とともに酸素の量がダイオキシン類の発生量に関係している。焼却過程で発生するダイオキシン類は、燃焼炉の内部及び電気集塵器の内部の2カ所から発生する。電気集塵器内では、デノボ生成により、煤塵に含まれる銅やコバルトなどが触媒となって塩化水素を塩素ガスに変え、この塩素ガスが排ガス中の未燃物と反応することによってダイオキシン類が生成する。ダイオキシン類がデノボ生成される最適の温度は約320℃で、200℃以下や400℃以上ではデノボ生成はきわめて起こり難い。デノボ生成を押さえ、かつ排煙中の水分凝縮による集塵効率の低下を防ぐ実用的な集塵温度は、電気集塵器で250～300℃、ろ過式集塵器で180～220℃と考えられている。このため、ろ過式集塵器は電気集塵器よりも低い温度で運転できるため、デノボ生成が少なく、飛灰中のダイオキシン濃度が低くなる（表7）。一方、焼却炉内に残る焼却灰中のダイオキシン類の濃度は、飛灰中に比べてかなり低い濃度になっている（表6）。これは、焼却灰は飛灰に比べて粒子径が大きいためダイオキシン類を吸着する能力が低いこと、また集塵器内の飛灰のようにデノボ生成が起こらないことによる。

新建材を含む建築廃材には、プラスチック、接着剤、塗料、金属、電線などがふくまれており、これらの燃焼によってダイオキシン類が多量に発生する。阪神大震災の倒壊家屋廃材の野焼き処理で発生したダイオキシン類の量は、西宮市・尼崎市・宝塚市の三市だけで、セベソの化学プラントの暴走事故で放出された量に匹敵する大量なものとなっている。大震災後の倒壊家屋の処理という特殊なケースばかりでなく、建築廃材の「野焼き」からもダイオキシン類が多量生成している。小規模の産業廃棄物の焼却施設は、焼却炉といっても実態は野焼きに等しく、さまざまな産業廃棄物、建築廃材がなんの規制もなく燃やされている。この結果、各種工場、建築廃材などの「野焼き」、家庭や事業所、学校、病院などでの簡易小型焼却炉による焼却などによるダイオキシン類の発生量の実態が明らかとなっていないため、日本において発生しているダイオキシン類の量は、正確なところは分かっていない。

都市ゴミに含まれている食塩がダイオキシン生成に関与するためには、食塩が塩化水素に変わる、あるいはさらに塩素ガスに変化する必要がある。二酸化イオウの補給源である石炭に食塩を添加した実験では¹⁸⁾、食塩を燃やすことによりわずかに塩化水素が発生し、極微量のダイオキシン類が燃え殻で生成されるが、塩素ガスはほとんど発生しないため、排ガス中のダイオキシン濃度に増加は見られなかった。一方、砂や粘土を模して活性白土に食塩を付着させた実験では²⁰⁾、300～900℃の焼却温度で食塩の50%以上が塩化水素に転換しており、ダイオキシンが生成し易い焼却条件下で活性白土の付着した食塩を有機物と一緒に焼却した場合、塩化ビニルを焼却したときと同程度の量のダイオキシンが生成した。これらの結果は、不適切な焼却条件下では、塩素源が有機・無機であることを問わず、塩素を含むゴミの焼却がダイオキシン生成の要因と成ることを示している。

現在のところ、都市ゴミ焼却によるダイオキシン発生を低減する最善の方法は、十分な高温、適切な滞留時間、過剰酸素、ガス混合といった良好な条件下で燃焼し、ダイオキシンを吸着したり分解することのできる高性能のガス処理設備を設けることである。従って、ダイオキシン抑制対策技術の基本は、(1) 完全燃焼、(2) 排ガス冷却過程における再生防止、(3) 排ガス処理設備による除去である^{21),22)}。完全燃焼状態をつくるためには、燃焼温度を800℃以上、一酸化炭素(CO)濃度を100ppm以下に保つ。排ガス処理過程でのデ・ノボ合成を抑えるためには、排ガス温度を200℃以下に

保ち、バグフィルターで集塵する。さらに、排ガス処理設備では、ダイオキシンの吸着除去及び触媒分解を行うことである。

こうした技術対策に基づいて全面的な建て替えがなされたオランダの新炉では、ゴミ1t当たりの排ガスへのダイオキシン排出量は190 μ g-TEQから1 μ g-TEQへと約200分の1に削減された。ドイツ・バイエルン州廃棄物研究所では都市ゴミ焼却炉周辺2.5km以内に大気サンプラーを設置し、数年にわたる環境大気モニタリングにより、焼却炉稼働前後でダイオキシンや重金属類の濃度に差が無いことを確認している。また、社会を上げてダイオキシン対策を推進してきた成果として、ドイツの都市における大気中ダイオキシン濃度が約50%減少していることも確認された。大気は燃焼によるダイオキシン発生源からもっとも近く、汚染物質の拡散が非常に速い、大規模な環境媒体である。削減に至ったプロセスとともに、こうした効果を確認する体制を整えていることは高く評価される。日本では、これまで、ゴミ焼却施設の煙突から出る排ガスは、煙突の高さが60mのときには約1kmの地点の汚染が最も高いとされ、焼却施設内の汚染はあるはずがないとされてきた。しかしながら、焼却炉内で維持・補修作業に従事する従事者は、ゴミ運搬業務の従事者よりも汚染度が高く、とりわけコプラナーPCBの汚染が著しくなっていたり、焼却施設の作業場だけでなく、事務棟内の職場環境も汚染されていた例もあり、焼却施設全体の環境調査と作業環境改善が必要になっている。

[6] 排ガス中のダイオキシン濃度規制値²³⁾

日本では、今から15年前の1983年に愛媛大学の立川教授らのグループがゴミ焼却場の飛灰からダイオキシンをはじめ検出し、その5年後の1988年5月の環境庁の調査で、東京湾のボラ、大阪湾のスズキから2,3,7,8-四塩化ダイオキシンが検出された。ところが、行政当局は、健康への影響はないとしてその後、必要な対策をとってこなかった。その結果、欧米諸国と比べ、対策が10年以上も立ち遅れている。1987年には、スウェーデンでは、新設炉の排ガス中のダイオキシン濃度を0.1ng-TEQ/Nm³、既設炉では0.5~2ng-TEQ/Nm³の規制を始めており、1989年にはオーストリアとオランダが、1990年にはドイツ、米国、カナダが同水準の規制を開始している。しかしながら、日本では、既設炉の暫定基準は80ng-TEQ/Nm³という極端に甘い規準となっている。

廃棄物処理を所管する厚生省は、1990年12月に「ゴミ処理に係わるダイオキシン類発生防止等ガイドライン(旧ガイドライン)」を策定し、1996年6月には当面の耐容一日摂取量(TDI)を10pg-TEQ/kg/日とする報告をまとめ(環境庁は1997年に「健康リスク評価指針値」として5pg-TEQ/kg/日という規制値を決めている)、これを基に1997年1月「ゴミ処理に係わるダイオキシン類発生防止等ガイドライン(新ガイドライン)」を策定して、緊急対策における暫定基準として80ng-TEQ/Nm³という値を導いている*。しかしながら、この新ガイドラインに対して、公害・地球環境問題懇談会²³⁾

*暫定基準の導出:

- (1) 耐容一日摂取量: 10pg-TEQ/kg/日
- (2) 一般環境でのダイオキシン類の摂取量: 大気から0.18pg-TEQ/kg/日、食品から5.9pg-TEQ/kg/日
- (3) 焼却施設周辺住民の過剰摂取分: 地場産の野菜類・牛乳などから3.8pg-TEQ/kg/日
- (4) 許容残量分: 0.12pg-TEQ/kg/日 (=10-0.18-5.9-3.8)
- (5) 耐容一日摂取量の範囲に収まる大気からの摂取分: 許容残量分(0.12pg-TEQ/kg/日)を排ガスから摂取するとして、大気による汚染の希釈20万倍、体重50kgの人の呼吸量15m³/日として、排ガス中のダイオキシン濃度は80ng

では特に次のような問題点を指摘している：（1）耐容一日摂取量は、1）ダイオキシン類には遺伝毒性がない、2）ダイオキシン類を発ガン物質とは考えない*、3）職業人のデータは採用しない、4）生殖毒性や催奇形成に関する動物データは採用しないという考えに立って判断しているため、規制値が甘くなっている。例えば、WHO国際がん研究機関（IARC）は1997年にダイオキシンの発ガン性について、ヒトに対して発ガンの可能性のある物質（「2B」）から、発ガン性有り（「1」）に評価を格上げしており、疫学データに不確実性がある場合には、厳しい規準を採用して被害の未然防止を図るという予防原則が生かされていない。また、アカゲザルの実験結果から得られた1.26pg-TEQ/kg/日という低い許容量については考慮されておらず、この点でも予防原則が生かされていない。（2）抜本的ダイオキシン対策には、行政が指導的立場で、大量生産・大量消費・大量廃棄という社会システムを変更することが不可避であるにもかかわらず、そうした観点が欠けている。（3）ダイオキシンと類似の性質を持つコプラナーPCBがダイオキシン類から除外されており、規準値としては片手落ちになっている。（4）測定の正確さと情報公開を保障するための、第三者によるチェック体制が欠けている。

[7] ダイオキシン類の分析²⁴⁾

ダイオキシン類の分析の目的には、（1）義務づけされている役所への報告、（2）ダイオキシン類による環境や生体汚染実態の調査・研究、（3）ダイオキシン類の環境中での移動や分解特性の研究、（4）ダイオキシン類の発生機構の研究、（5）焼却施設などの日常運転管理、（6）焼却施設などの運転管理条件や施設の改善、（7）ダイオキシン類発生抑制技術や除去技術の開発などが考えられるが、（5）～（7）の項目の進展の大きな阻害要因となっているのが、公定法に準拠した非常に煩雑で多大な費用と時間を要するダイオキシン類の測定方法にあることが指摘されている。

（1）公定法によるダイオキシン類測定の基本手順^{18),24)}

公定法では、2,3,7,8の位置に塩素の付いた17種類のダイオキシン類を全て分離して濃度を求め、それぞれに2,3,7,8-TCDD毒性等価係数を掛けて求めた2,3,7,8-TCDD毒性等価量（TEQ）の合計として表すことになっている。最近では、このほかに13種類のコプラナーPCBも含めて測定を行う方向にある。ダイオキシン類の分析にあたっては、pptレベル以下の高精度の超微量分析が要求されるため、器具はあらかじめアセトンやヘキサンなどの脂溶性溶媒で洗浄し、分析妨害物質による汚染を取り除いておく。図6に示されるように、ダイオキシン類測定の基本手順は、1）ガス試料では、排ガス捕集装置による試料の採取、2）ダイオキシン類の抽出と濃縮、3）操作中に損出するダイオキシン類の量を

TEQ/Nm³ (=0.12 x 50 x 200000 / 15)

（6）したがって、排ガス中のダイオキシン濃度を80ng-TEQ/Nm³に規制。

*ダイオキシンが遺伝子に損傷を与え、ガン細胞を増殖させる作用（発ガン性）を持つ場合、1つの細胞でもガン細胞になればガンが進行していくため、この量までなら安全という閾値はなくなり、発ガン性を持つ化学物質の規制基準値は極めて小さくなる。米国の基準値はこの考え方を採用している。

一方、ダイオキシンには遺伝子に損傷を与える作用はなく、ガン化した細胞の増殖を促進する作用だけを持つ場合には、この量までなら安全という閾値があることになる。日本、カナダ、英国などの基準値はこの考え方を採用している。

補正するための標準物質の添加、4) DDT、HCH、ディルドリン、塩化ベンゼン、PCB、ベンゾピレンなど多環芳香族炭化水素などの脂溶性分析妨害物の除去・精製、5) 高分解能磁場型ガスクロマトグラフ・質量分析計(GC/MS) によるダイオキシン類の定量から成る。

公定法に準拠したダイオキシン類の測定には、1) 多大な時間や労力と高レベルの技術を必要とし、2) 大量の有害な溶剤を使用し、3) 高額な分析機器を必要とする、4) 使用するダイオキシンの標準試料が高価で、5) 測定業界が限定されているため、依頼分析代も高く、日数もかかるという問題点がある。1998年に宮田¹⁸⁾によって試算されたダイオキシン類の分析に要する経費を見てみると、分析に用いられる高分解能磁場型GC/MSは約8千万円で、年間のランニングコストが約6百万円かかる。商業ベースで民間に委託する場合、ダイオキシンとポリ塩化ジベンゾフランを対象とした、1試料当たりの分析費は約30万円、コプラナーPCBを含めた分析費は約40万円かかり、排ガス試料や大気試料の場合には別途に試料採取費が必要となる。大気中のダイオキシン類濃度は気象条件によって変動し易く、ある地点の平均大気濃度を正確に測定するためには、年間に少なくとも50回の測定が必要とされているため、その分析費は1千5百万円にもなる。さらに、焼却排ガスや排水、土壌などの中のダイオキシン類の濃度は施設や地域によって3桁も異なったり、同一施設でも測定日によってダイオキシン類濃度は数倍変動し、土壌も採取の場所や仕方によって数倍変化する。

浦野²⁴⁾が指摘しているように、今最も必要とされているのは、高濃度の排出源や汚染地を調査し、優先的に対策を行い、効率的に削減や浄化を進めてゆくことである。この目的のためには、公定法が要求している極低濃度までの感度は不要な場合が多く、有効数字3桁以上の精度を求める必要もなく、例えば、焼却排ガスの場合には分析の妨害物質も少ないことが多いので、精製などが簡易化できる。高精度の年1～2回のデータを得るよりも、多少精度が低くなっても、効率的な方法で、多数のデータを得る方が実態をより正確に評価でき、施設の改善や運転管理の最適化にも有効である。このことから、浦野²¹⁾は、実態調査や削減技術の開発を促進するためのダイオキシン類の効率的な測定方法や簡易な推算方法を提案している。

(2) ダイオキシン類の詳細測定の効率化²⁴⁾

ガス試料の採取において、XAD-2樹脂を使用せず、吸収瓶の数も減らし、毒性や揮発性が比較的低いトルエンで抽出する方法によっても、公定法と同等の回収率が得られる方法が開発されている。現に、英国規格では、XAD-2樹脂を使わず、捕集装置の段数の少ない様々な方法が示されている。さらに、多層シリカカラムによる精製においても、多くの排ガスで3層で良いことも確認され、アルミナカラムも充填物の状態を良好に保つことにより公定法の1/2～1/3の溶媒量でも再現性良くPCB類とPCDD類やPCDF類が分離できることが確認されている。また、従来より十～百倍の大量な試料を導入できる方法を採用することで、安価な分析機器(四重極GC/MS)で高感度の分離・定量が可能である。さらに、毒性等価係数が著しく小さい塩素数8のダイオキシン類の測定を省くことで、半分の手間で分析ができることになる。こうした効率化により、操作時間を約1/3以下、使用溶媒量も約1/5にでき、測定費用が大幅に安くできることになる。

(3) ダイオキシン類の簡易推算方法^{1) 24)}

ダイオキシン類の排出状況や土壌の汚染状況および運転管理の改善効果の評価などでは、測定が容易な代替指標を用いて2,3,7,8-TCDD毒性等量濃度を推算する方法が効率的である。毒性等価係数の異

なる各異性体の構成が変化するにもかかわらず、ダイオキシン類合計濃度とTEQ濃度との間に良い相関あることが明らかになっている ($R=0.986$) :

$$\text{ダイオキシン類TEQ濃度 [ng-TEQ/Nm}^3\text{]}=(0.0070) \cdot (\text{ダイオキシン類合計濃度 [ng/Nm}^3\text{)})^{1.1}$$

この合計濃度の測定では、同族体をまとめて測定すればよいため、異性体を分離し、超高感度で分析する必要がなくなり、ガス捕集量も少量で済み、約1/4の時間で分析できる。

(4) ダイオキシン類の簡易推算方法 2²⁴⁾

また塩化ベンゼン類は主要なダイオキシン類の前駆物質の一つで、ダイオキシン類に比べると濃度が数十倍高いため、測定が容易である。塩素数3以上の塩化ベンゼン類の合計濃度とダイオキシン類合計濃度との間に比較的よい相関が認められている ($R=0.864$) :

$$\text{ダイオキシン類合計濃度[ng/Nm}^3\text{]}=(39) \cdot (\text{塩化ベンゼン類合計濃度[}\mu\text{g/Nm}^3\text{)})^{1.1}$$

このため、上記(3)節の式を用いれば、TEQ濃度との間に次のような関係が導かれる:

$$\text{ダイオキシン類TEQ濃度[ng-TEQ/Nm}^3\text{]}=(0.39) \cdot (\text{塩化ベンゼン類合計濃度[}\mu\text{g/Nm}^3\text{)})^{1.2}$$

(5) ダイオキシン類の簡易推算方法 3²⁴⁾

排ガス中の揮発性の低い有機ハロゲン化合物(沸点200℃以上)を塩素の総量として測定する難揮発性有機ハロゲン(NVOX)の分析は、精製操作も不要で、安価な全有機ハロゲン計(TOX計)で迅速かつ容易に測定でき、しかもダイオキシン類合計濃度との間に比較的よい相関が認められている ($R=0.904$) :

$$\text{ダイオキシン類合計濃度[ng/Nm}^3\text{]}=(2.6) \cdot (\text{NVOX[}\mu\text{g-Cl/Nm}^3\text{)})^{1.1}$$

このため、上記(3)節の式を用いれば、TEQ濃度との間に次のような関係が導かれる:

$$\text{ダイオキシン類TEQ濃度[ng-TEQ/Nm}^3\text{]}=(0.020) \cdot (\text{NVOX[}\mu\text{g/Nm}^3\text{)})^{1.2}$$

(6) ダイオキシン類の簡易推算方法 4²⁴⁾

抗原抗体反応を利用したイムノアッセイ(免疫測定法)の一種である酵素免疫法によってダイオキシン類を簡易に測定するキットも市販されている。これは、ダイオキシン類と結合する抗体をつけた試験管にダイオキシン類を含む試験液と標識酵素を入れて抗体と競争結合させ、未反応物を洗浄して除いてから、標識酵素と反応する試薬を加え、生成する物質を発色させてその色を光電比色計で測定し、対照との差からダイオキシン類の濃度を求めるものである。米国環境庁の認定商品として土壤汚染地域の汚染分布地図の作成や環境修復作業の効果判定に採用されている。測定濃度範囲が狭いことや、妨害物質の影響が不明確であることなど注意が必要であるが、測定機器が安価で、分析に高度な技術がいらぬ利点がある。

[8] ダイオキシン削減対策

日本のゴミ行政においては、廃棄物はまず焼却して減容し、残渣を埋立処分することが基本となっている。このため、ダイオキシン問題を克服する行政主導の提案では、高温連続燃焼の大型炉を建設することと、焼却残渣に石灰を加えてセメント化し、道路の舗装や海の消波ブロックに使うことが考えられている²³⁾。また、ゴミ燃料化(Refuse Derived Fuel, RDF)施設などの方策も示されているが²¹⁾、これは河内⁸⁾や酒井¹⁴⁾も指摘しているように、一歩間違うと、ゴミ減量・リサイクルの原則に反

してゴミ量を増やすことになったり、広域化に伴う輸送段階で環境負荷が増えすぎたり、RDF焼却施設周辺にダイオキシン問題を集中させる恐れがある。こうした行政主導の提案に対して、公害・地球環境問題懇談会²³⁾では、(1) 持続可能な社会をつくるという視点が欠けており、循環型の社会システムへの動機付けを与えていない、(2) 行政は、事業者が自らの事業活動から出るゴミに責任を持ち、事業活動のあり方を常に改善するような動機づけを与えていない、(3) 利益は当事者が受け取り、ゴミ処理費用など不利益は税金などの公的資金で負担する構造では、メーカーが大量生産・大量消費をあり、結果として消費者が大量廃棄するのは当然である、(4) 有害有用資源を道路や海に拡散させることになる、(5) 一般廃棄物の処理費用として現在国民一人当たり年間約2万円を負担しているが、これらの提案の実施により、さらに年間2万円の負担が強いられることになる、(6) 行政は、業界におもねた施策や、市民に対する情報隠しなどによって、むしろゴミ問題の解決を阻んでいるといっても過言でない、と厳しい批判を行っている。ゴミ問題の解決は、排出されたゴミをいかに処理するかではなく、ゴミ発生自体をいかに少なくするかということにかかっている。このため、事業者や消費者が、廃棄物となる製品の処理費用を負担することになれば、修理やリサイクルをして使用し続ける動機づけになる。このため、汚染者負担の原則 (Polluter Pays Principle, PPP) を徹底し、廃棄された製品がリサイクルシステムに入るよう、製品の価格には回収・再製を促進する再製費用を含めたデポジット制の採用が不可欠となっている²³⁾。例えば、家庭系ゴミは重量比で約50%が古紙、30%が生ゴミ、残りの20%は缶、瓶、プラスチックなどの不燃物である²³⁾。古紙と缶、瓶、プラスチックなどの容器については、メーカーが有効なデポジット制を採用して完全に回収し、再製利用あるいは再利用する、また生ゴミについては堆肥化することによって焼却処理する家庭系ゴミは限りなく少なくなり、その結果埋め立てる残渣も限りなく少なくなる。これらは、すでに欧米の環境先進国で実施されていることであり⁸⁾、日本でも実施することは十分可能である。さらに、自治体が定める条例には、地方自治法によって法律や政令に違反しない限りという制約が課せられているため、国の政策を変えさせない限り自治体だけでゴミ問題を全て解決することは困難であるが、住民の生活を守るため、情報を公開し、住民の参加を確保しながら、ゴミ問題解決への自治体の行政施策を積極的に展開することは可能である。ここ東海村においても、1999年7月1日から情報公開条例が施行されることになっており、この先駆けとして、ダイオキシン類の測定結果について、1998年10月～1999年1月の調査結果が公表された(表8)²⁵⁾。自治体が保有するこうした情報は、問題解決に向けて冷静な議論を行う際の基礎資料として大いに役立つものである。

宮田¹⁸⁾は、家庭でできる有効なダイオキシン削減対策として、(1) できるだけゴミになるものを家庭に持ち込まないようにし、ゴミを出さない生活スタイルをつくる、(2) ベンゼンなどの環状化合物ができやすい発泡スチロールなどがゴミとして他のものと一緒に燃やされると、塩素と結合してダイオキシン類を生成するため、ゴミとなるものについては、塩ビ製品などの塩素を含むプラスチック類はもちろんのこと、塩素を含まない発泡スチロールなどのプラスチックも分別する、(3) デノボ生成が起りやすい金属とゴミを同時に燃やすことを避けるため、ビニール電線、電気製品や金属製品、電池を焼却ゴミに混ぜないことを挙げている。さらに、焼却に伴う問題点として、ダイオキシン類の発生以外にも、(1) 日本の膨大な数の小規模焼却炉を改善するためには、莫大な資金が必要となり、(2) 焼却に伴ってダイオキシン類のような有害な有機物以外に、塩化水素を主体とする有

害な無機ガス成分が発生する、(3) 焼却に伴う二酸化炭素の発生量が増加する、(4) 有効利用できるものを燃やすことで、かなりの種類の資源の枯渇が予想されることを挙げ、ゴミの有効成分の分別の徹底をはかり、燃やすゴミをいかに減らすかが、限られた資源の枯渇を阻止する有効な手段であることを強調している。

したがって、都市ゴミ焼却過程で発生するダイオキシンを減らすためには、まず、ゴミの排出抑制とリサイクルなどにより、焼却対象となる都市ゴミ自体をできるだけ減らすことが求められる。さらに、リサイクル過程で大きなダイオキシン発生がない限り、従来ゴミとなっていた排出物を資源としてリサイクルすることが有効である。ただし、酒井¹⁴⁾が指摘しているように、リサイクルをしてもいづれ劣化して排出されるゴミや個人の行動のゆらぎによって発生するゴミ、病毒で汚染されたゴミなどは焼却処理に頼らざるを得ないため、焼却に対するダイオキシン対策は必須となる。しかしながら、排ガス中のダイオキシン濃度を下げれば残渣中の濃度も下がることが多いため、ダイオキシン対策としては、焼却過程での排ガスに対するダイオキシン抑制を行うとともに、ダイオキシンを分解する技術を採用することが重要となる。これによって、都市ゴミ焼却過程で、ゴミ自体の持つダイオキシン負荷よりも、排出物総量のダイオキシン負荷を減らすことができるようになれば、社会の分解プロセスとして機能することになる。ゴミとしてすでにゴミ1t当たり10 μ gレベルのダイオキシン投入負荷をもっているため¹⁴⁾、焼却処理過程が社会の分解プロセスとして機能するためには、ダイオキシンの排出総量を1t当たり10 μ gレベル以下に抑える必要がある。こうして、ダイオキシン濃度の高い製品や食品が廃棄される時、リサイクル過程、焼却過程で分解できれば、環境保全につながることになる。酒井¹⁴⁾は、こうした対策は、多環系芳香族類をはじめとする他の多くの化学物質にたいしても適用可能であることを指摘している。ただし、ダイオキシン濃度の高い汚染土壌をどう取り扱うかは今後の課題であり、ダイオキシンを分解・除去できる高温溶融²⁶⁾や化学的脱塩素化、安定化できるセメント固化法など土壌を処理できる技術は育ってきているが、現実に適用するまでには至っていない。

4.2.3 保存性・非保存性混合物質

4.2.3.1 シュレッダーダスト¹⁴⁾

シュレッダーダストは、廃自動車や廃家電製品などを破碎機（シュレッダー）で破碎し、有価物を選別・回収したあとの廃棄物で、プラスチック類の他、ゴム、ガラス、繊維くず、廃油などが混じった混合廃棄物である。シュレッダーダストを都市ゴミと比べてみると、廃油や可塑剤に由来する有機物濃度、並びに電線、電池、塗料片などに由来する重金属類の濃度がともに高い。シュレッダーダストの溶出試験の結果から、界面活性効果のある化学物質の存在によって残留性有機物質（POPs）が溶出し易くなることや、有機酸の存在によって重金属類が溶出し易くなることが分かっており、シュレッダーダストの埋立処分地周辺では有害物質による環境汚染が報告されている¹⁶⁾。こうしたことから、増大するシュレッダーダストに対して、早急な減量化、無害対策が必要となっている。同時に、再資源化（物質回収）や熱利用（エネルギー回収）も望まれるが、現状では様々な有害物質が混入しているため、主な処理方法としては熱利用が中心で、有望なシステムとして、ガス化燃焼プラントや直接溶融プラントによる廃熱利用が考えられている。

5. 環境保全・修復技術の適用例

藤木¹⁹⁾が力説するように、廃棄物処理は大きな社会ニーズであり、その処理方法においては規制が一層厳しくなるものと予想されるが、それは裏を返せば問題解決のための新しい技術開発が望まれていることでもある^{27),28)}。また一方で、廃棄物ゼロ化も大きな社会ニーズであり、そのためには分別・排出されたそれぞれの廃棄物の再資源化技術のみならず、さらに再資源の高付加価値化と新しい用途開拓のための技術開発が強く望まれている。例えば、自動車・家電分野から出る廃棄物からの有用金属や希少金属の回収技術、建設分野から出る廃棄物の処分及び再利用化技術などはまだ確立されていない。廃棄物処理・再資源化関連分野は産業としてどうしても育成しなければならない重要課題であり、そのニーズの多様性からみてベンチャービジネスの宝庫である。藤井²⁹⁾もまたウェスト・テクノロジーと称してゴミ廃棄物から本当の「商品」を作り上げることの重要性を説いている。

廃棄物処理の新しい時代への方向は明確になっている^{19),30)}。エネルギーや資源を大量に使う大量生産－大量消費－大量廃棄の動脈型経済システムから、最小資源で最大効果を発揮する商品を生産するとともに、廃棄物の再資源化－環境負荷の少ない製品生産－節約消費の静脈型経済システムへの転換である¹⁹⁾。こうした循環型社会づくりで日本がまず取り組まなければならないことは、狭い国土事情から、焼却物を最小限にし、埋立廃棄物をゼロにすることである。藤木¹⁹⁾は、ゴミ問題におけるダイオキシン類の発生低減化をキーワードとしたいいくつかの新たな試みの例を示しながら、来たるべき資源循環型社会においてさまざまな新事業の展開が可能であることを示唆している。ここでは、その幾つかを取り上げ¹⁹⁾、環境に関する技術がいかに広範な分野にわたるものであるか、さらにその開発の方向がいかに多様な広がりを持つものであるかということを確認しておきたい。

5.1 ダイオキシン分解技術の開発

(1) 触媒によるダイオキシン分解¹⁹⁾

1997年7月7日、日本触媒はダイオキシン類を分解する新触媒を開発した。触媒は数種の金属の酸化物からなり、加工製品は内部が格子状になった四角柱をしている。ゴミ焼却から出る排ガス中のダイオキシン類がこの新触媒を通ると、酸素と反応して塩酸と二酸化炭素と水に分解し、99%以上を除去できる。既存の焼却炉にも簡単な工事で設置できる。

(2) 超臨界水でのダイオキシン分解¹⁹⁾

水の臨界点（374℃、220気圧以上）を超えた超臨界水中では、高密度の激しく熱運動する水分子によってダイオキシン類は容易に二酸化炭素と水と塩化水素に分解される³¹⁾。オルガノは装置の開発に取り組み、事業化を図っている。また、工業技術院物質工学工業技術研究所の指導で、つくば市の筑南クリーンセンターで実証試験が行われている。

(3) バイオによるダイオキシン分解¹⁹⁾

1997年3月14日、福岡県保健環境研究所と九州大学農学部の共同研究チームが、ダイオキシン類を分解する白色腐朽菌と呼ばれるキノコを発見した。米国の研究者が殺虫剤やDDTなどを分解する能力

は確認していたものの、ダイオキシンに対しては初めて確認された。現状では分解速度が遅いのが難点であるが、遺伝子操作技術などで機能性向上が図られるならば、ダイオキシン類のバイオ処理の実用化が現実のものとなる。

5.2 素材の開発

(1) レジ袋素材開発¹⁹⁾

1997年7月中旬より、西友百貨店はダイオキシン類が発生しにくい素材を用いたレジ袋を採用した。従来のポリエチレン素材は、焼却の際不完全燃焼するとダイオキシン類が発生し易いことや、不透明にするため5%のアルミニウム粉を混入しているため焼却残灰が多く発生する。大倉工業との共同開発により、ポリエチレン素材に燃焼促進作用のある活性酸化鉄を混入し、焼却炉で完全燃焼させることでダイオキシン類の発生を90%抑制でき、アルミニウムの混入量も2%まで減らすことができた。ちなみに、鉄分にはダイオキシン類のデノボ生成を促進する触媒作用は無い¹⁸⁾。

(2) 非塩ビ系包装素材¹⁹⁾

大手スーパー各社は、生鮮食品などを包む業務用食品包装ラップを、現在主流の塩化ビニール素材から非塩ビ系のポリオレフィン系素材に切り替え始めている。ポリオレフィン (Polyolefin) はポリエチレン (Polyethylene) やポリプロピレン (Polypropylene) などの総称である。従来、ポリオレフィン系包装ラップは機能的に塩ビ素材に比べて強度や密着性の面で劣っていたが、改良がなされてきており、電子レンジの使用にも耐えられるようになった。ポリオレフィン系ラップの製造メーカーとしては三菱樹脂が有名であるが、最近では、日本生活協同組合連合会と理研ビニル工業が共同開発したプライベート・ブランドのポリオレフィン系素材の家庭用ラップも販売されている。

(3) 紙製食品容器¹⁹⁾

1997年8月12日、カスミグループは継ぎ目のない紙製弁当箱など新しい紙製食品容器を開発し、9月より同グループの不ニコーン製作所で製造を始めた。金型にパルプを流し込んで成形する技術で、継ぎ目のない複雑な形の紙製容器も加工できる。現在のところ、プラスチック製や発泡スチロール製より7割程度高いが、冷凍しても割れず、電子レンジにかけても変形しない。焼却してもダイオキシン類が発生せず、土に埋めると数カ月で腐る。

(4) 新素材小型污水处理槽¹⁹⁾

1997年7月9日、浄化槽メーカーの前沢化成工業は、日本ゼオンが開発した水素と炭素の化合物「ジシクロペンタジエン (Dicyclopentadiene)」素材を加工して、焼却処理がし易く、ダイオキシン類などが発生しない家庭用小型污水处理槽を商品化した。

5.3 再利用技術の開発

(1) 焼却灰のセメント化¹⁹⁾

1997年9月1日、太平洋セメントは子会社ナコード (Nacode Corporation) を設立し、埼玉県が推進

する「倍プラント化計画*」に呼応して、都市ゴミ焼却灰や浄水場発生土、下水汚泥、鋳物廃砂のリサイクル事業に乗り出した。特に、都市ゴミ焼却灰は熊谷工場で重金属除去、脱塩素化処理を施した後、「エコセメント**」原料としてリサイクル化を図ろうとしている³²⁾。

東京都多摩地域の31市町村では、広域共同事業として地域内で発生するゴミを焼却して出る灰の全てを原料とする「エコセメント工場」を建設する予定である。焼却灰のエコセメント化で灰の全量が活用できるとともに、高温で焼成するためダイオキシン類を分解・消滅できる。また、自治体の負担額が、埋立処分の場合と比べて約40%節約されると期待されている。

(2) 塩化ビニールの再利用¹⁹⁾

1997年9月1日、NKK、塩化ビニール環境対策協議会、プラスチック処理促進協会は共同で、溶鉱炉を使用して塩化ビニール樹脂の再利用技術の開発を始めた。回転式ロータリキルン炉で廃塩化ビニールを熱分解し、有害な塩素は高濃度塩酸として回収し、残りを高炉燃料とする。

(3) 繊維強化プラスチックの再生化¹⁹⁾

1997年、シャイン電子と中林建設は共同で、繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastic、FRP）の回収・再生の事業化を始めた。ガラス繊維とプラスチックの複合材料で分離が困難だったため、従来は埋め立てるか、焼却するしかなかったものを、破碎、水を加えて冷凍、粉末化、乾燥、静電気分離という方法によって樹脂とガラス繊維に分離し、前者はFRPの原料として再利用し、後者はセメントと混合して再生レンガとする。

5.4 資源循環型社会をめざした開発

(1) 生ゴミリサイクル¹⁹⁾

1998年度から、コンビニエンスストアチェーンのファミリーマートが、東京23区内の店舗で売れ残った弁当・惣菜などの生ゴミのリサイクル事業に乗り出した。指定業者が、各店舗から生ゴミを回収し、肥料工場まで運ぶ。工場では、有機肥料を生産し、契約農家へ販売する。農家はそれで野菜を生産し、生産野菜は同社指定の食品加工業に販売する。食品加工業者は、弁当・惣菜を作りファミリーマートチェーン店に販売する。ただし、弁当・惣菜に含まれている塩分や添加物をどうやって取り除くかは、今後解決されるべき問題である。

(2) 生ゴミのバイオ処理技術¹⁹⁾

1997年1月9日、ワシントンホテルはエスキー工機と共同で、生ゴミのバイオ技術による分解装置を開発し、チェーンの全てのホテルから出る生ゴミを自前処理して生ゴミ廃棄をゼロにする試みを始めた。微生物の働きによって生ゴミを発酵させ、水と二酸化炭素に分解する。既存の23ホテルからは、一日平均3.5tの生ゴミが発生しており、5年後には全ホテルに装置が導入される予定である。

1997年10月に明石市に開業した大型複合商業施設「マイカル明石」では、最終廃棄物量を、発生し

*生産設備である民間工場(プラント)を従来の目的である製品の製造に加え、廃棄物の原料化、燃料化による有効活用という2倍の方法で活用していこうとする計画。

**セメントは石灰石と粘土を主原料とするが、この原料の40%を占める粘土の代わりに焼却灰を使用するセメントをエコセメントと呼んでいる。

たゴミ全体の約5%に抑制することを目指したシステムを導入している。生ゴミは鹿島が開発した分解率約90%のバイオ処理装置でメタンガスと水に分解し、発生したメタンガスは温水ボイラーの燃料に活用される。段ボール箱なども使用を原則として中止し、再生可能なプラスチック製の「通い箱」に置き換えている。

1997年12月11日、石川島播磨重工業、NKK、新日本製鉄、東レエンジニアリング、三井造船の5社は、生ゴミ、し尿汚泥、畜産糞尿などの有機性廃棄物からバイオガスを製造し燃料化する廃棄物処理システム分野に進出し始めた。バイオガス技術は、ドイツのシュバルティンク・ウーデ社とスイスのビューラー社から導入する予定である。

(3) コージェネレーションシステム¹⁹⁾

通常の火力発電では、廃熱や送電ロスでエネルギー効率は40%程度である。しかし、熱電併給のコージェネレーションシステムでは、総合効率は70~80%まで高められる。

(4) ゼロ・エミッションの工場¹⁹⁾

アサヒ飲料は、明石工場と北陸工場の2工場で「廃棄物ゼロ」を目指す取り組みを行っている。麒麟ビールでは、「廃棄物ゼロ作戦」を徹底させ、7工場で既に100%の再資源化を行っている。廃棄物の大部分を占める「仕込みかす」は、従来は家畜の飼料や肥料であったが、分別することにより、パルプ代替品やキノコ栽培用資材などに用途を開拓している。鐘紡は1999年3月までに、化粧品を全国の2万5千店の契約小売店に配送する際の梱包材料を、段ボールからプラスチック製折り畳み式コンテナ（オリコン）に切り替えることになっている。こうした古紙の発生を減らす試みとともに、古紙の他の用途先を開拓することも重要となっている。

(5) ゼロ・エミッションの町づくり¹⁹⁾

ダイオキシン問題は、根本的には廃棄物を出さないことが最善の解決策になる。そのためには、消費したものは廃棄物ではなく再資源化物とする、資源循環型社会の構築が必要不可欠となっている。山梨県の国母工業団地では、全国に先駆けて「ゼロ・エミッション計画」が推進されている。荏原製作所では、工場だけでなく、住宅や農地も含めた「総合的ゼロ・エミッションの町づくり」を計画している。神奈川県藤沢市の同社工場の一角に2000年の完成を目指して人口2000人規模の実験地区を建設し、住宅を中心に水・し尿処理施設、太陽光発電装置、農園を配置し、水、エネルギー、廃棄物をできるだけ再利用して、水やエネルギーの消費量を30%、廃棄物を85%削減する目標を立てている。

6. あとがき

日本の廃棄物事情は、(1) 発生量の増大によって処理・処分能力の限界に近づき、(2) 全国的な化学物質汚染が進行しているにもかかわらず、(3) 大量生産・大量消費が前提となっているため、最も有効な減量・リサイクル対策が未成熟であるという、危機的状況にある。そこで、こうした状況を打開するため、(1) 発生抑制（回避）、(2) リサイクル（物質及び熱）、(3) 適正処理という廃棄物対策の基本手順を重視した有効な施策や技術開発が強く求められている。特に、有害物質に関しては、ものの循環、廃棄過程を念頭においた取り組みが必要である。まずは、本来の機能を発揮するためにそうした化学物質が本当に必要か見直し、製品そのものをクリーン化する。もし、どうして

も使わざるを得ない社会的な合意が得られれば、循環システムをつくる必要がある。その際、有害性に対する科学的な疑いがあれば対策を講ずるという「予防原則」と、より有害性の低い代替物へ転換することを製造者、使用者に求めるという「代替原則」が基本となる。そして、有害物質の適正処理は、廃棄物対策の基本手順からすると最後の手段と見なすべきである。

商品の使用・廃棄を通じて、誰もが環境汚染の被害者であるとともに発生者とならざるを得ない今日の社会の中では、廃棄物の発生量を少なくするとともに、環境汚染のより少ないものを選択することが重要である。このためには、消費者が、生活者として環境ラベルやリサイクルシステムの整備を求め、健康や環境にとってより安全な製品選択を始めることが大切である。また、一定割合以上に濃縮されたものが資源となり得るものであるから、資源循環型社会をめざす場合には、分別収集が重要な要素となる。しかしながら、身近なところを見る限り、当研究所で廃棄される大量の印刷用紙や雑誌類は、設置されている分別箱によって一旦は3種に分別されるものの、結局のところ再利用に回されることなく可燃物として焼却されているのが現状である。やはり、資源循環型社会にとっては、首尾一貫した有効なリサイクルシステムを社会的に確立することが不可欠である。一方、循環を前提とした生産-再生産システムの中では、生産者は製造者であり、かつ解体者、廃製品の消費者ともなるため、生産者は解体コストを下げ、廃棄物の経済価値を上げるための設計に向けて思考転換が要求される。結局のところ、少ない消費、少ない労働時間でいかにして高質の生活を得ることができるかが、廃棄物問題を解決する鍵となっている。

資源循環型社会では、焼却物を最小限にし、埋立廃棄物をゼロにすることが理想である。廃棄物対策の基本手順に沿って考えると、例えば、(1)発生回避のためには、生産・流通・使用それぞれの段階で、循環を促進する新しいシステムを導入し、循環を促進する新素材の開発、省エネルギー・省資源型のクリーンな製品の開発などを行う。また、(2)物質・熱のリサイクルを実現するためには、リサイクルを促進する新しいシステムを導入し、再利用技術の開発、再生製品の用途先の開拓などを行う。さらに、(3)適正処理並びに修復のためには、有害物質の回収技術の開発、有害物質の無害化及び安定化技術の開発、廃棄物の有用化技術の開発などを行うということが挙げられる。実際のところ、資源循環型社会に不可欠となるどの分野においても、解決すべき課題は数多く存在している。このことは、至る所に開発すべきテーマが存在しているとともに、開発される環境技術に対して期待が高まっていることを意味している。

参考文献

- 1) NHK取材班：「地球大紀行」、第1巻～第6巻、日本放送出版協会（1987）。
- 2) 松井孝典、田近英一、高橋栄一、柳川弘志、阿部豊：「岩波講座地球惑星科学 1 地球惑星科学入門」、岩波書店（1996）。
- 3) 国立天文台編：「理科年表 平成11年 1999」、丸善、85-192（1998）。
- 4) S.W.ホーキング：「ホーキング、宇宙を語る ビックバンからブラックホールまで」、林一訳、早川書房（1989）。
- 5) 都筑卓司：「時間の不思議：タイムマシンからホーキングまで、ムムッ、虚時間？」、講談社（1991）。
- 6) 酒井弥：「ラン藻で環境が変わる 劇的！農薬・ダイオキシン分解も」、技報堂（1998）。
- 7) 北野康：「新版 水の科学」、日本放送出版協会（1995）。
- 8) 河内俊英：「環境先進国と日本ーデンマーク・ドイツの廃棄物政策とエコシティづくりー」、自治体研究社（1998）。
- 9) 福永勲：「欧州における都市ゴミ処理技術の動向」、廃棄物処理学会誌、9巻、7号、487-495（1998）。
- 10) 通販生活編集部：「20年後、日本は『風力発電大国』になる」、通販生活、18巻、3号、214-217（1999）。
- 11) 藤原寿和：「ドイツ・ゴミ行政から産業行政へ」、世界、652号、126-127（1998）。
- 12) 佐野真一：「商品の墓場」、通販生活、18巻、1号、66-73（1999）。
- 13) 陸田彰夫：「ごみ固形化燃料技術」、セラミックス、33巻、7号、514-516（1998）。
- 14) 酒井伸一：「ゴミと化学物質」、岩波新書562（1998）。
- 15) 市橋利夫：「日本の一般の廃棄物と放射性廃棄物」、日本原子力学会誌、40巻、8号、586-597（1998）。
- 16) 酒井伸一：「ダイオキシン類のはなし」、日刊工業新聞社、（1998）。
- 17) 水口憲哉：「有毒化学物質の真の危機とは何か 『環境ホルモン騒ぎ』をこえて」、世界、第656号 249-260（1998）。
- 18) 宮田秀明：「よくわかるダイオキシン汚染 人体と環境を破壊する猛毒化学物質」、合同出版、1998。
- 19) 藤木良規：「猛毒ダイオキシンと廃棄物処理」、筑波出版会（1998）。
- 20) 塩化ビニル環境対策協議会：「ダイオキシン生成への食塩の関与、京大との共同研究で確認」、PVC News、No. 27、インターネット <http://www.pvc.or.jp/pvc/>（1998）。
- 21) 石川禎昭：「ごみ処理の最先端プラント技術と灰溶融」、日報（1997）。
- 22) 西川進、魚屋和夫、保田雄二、仙波範明、田熊昌夫、志田恵、末岡靖裕、甘利猛、小川弘：「フレッシュマンのための廃棄物処理技術」、化学装置、41巻、4号、27-102（1999）。
- 23) 公害・地球環境問題懇談会 [JNEP] 編：「ダイオキシンはなくせる なくせ公害・守ろう地球環境！」、合同出版（1998）。

- 24) 浦野紘平：「第4章 ダイオキシン類の測定と排出抑制」、科学のとびら ダイオキシンと環境ホルモン、日本化学会（1998）。
- 25) 東海村：「広報 とうかい お知らせ版」、第84号（1999）。
- 26) 茨城新聞：「ダイオキシンを無害化」、1999年5月7日版（1999）。
- 27) 谷川昇：「新処理技術の展開」、廃棄物処理学会誌、9巻、7号、470-486（1998）。
- 28) 中村一夫：「新処理技術を組み合わせたシステムの検討」、廃棄物処理学会誌、9巻、7号、496-508（1998）。
- 29) 藤井勲：「廃棄物事業の最前線」、世界、第652号、128-132（1998）。
- 30) 佐伯康治：「現代技術体系と廃棄物 ー処理の技術とシステムー」、日刊工業新聞社（1980）。
- 31) 碓屋隆雄監修：「超臨界流体反応法の基礎と展開」、シーエムシー（1998）。
- 32) 須藤勘三郎、原田宏、高橋寛昭：「都市ごみ焼却灰のセメント原料化システムの開発」、セラミックス、34巻、5号、349-353（1999）。

表1 日本の一般廃棄物処理の現状（酒井¹⁴より）

| | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 人口（百万人） | 122.3 | 122.8 | 123.3 | 123.6 | 124.0 | 124.5 | 124.8 |
| 廃棄物発生量 | | | | | | | |
| 一般廃棄物（百万t） | 46.5 | 48.4 | 50.0 | 50.4 | 50.8 | 50.2 | 50.3 |
| 産業廃棄物（百万t） | - | - | - | 395 | 398 | 403 | 397 |
| 建設廃棄物（百万t） | - | - | - | 54.8 | 58.4 | 66.9 | 61.5 |
| 一般廃棄物の処理 | | | | | | | |
| 焼却（%） | 72.6 | 72.7 | 73.9 | 74.4 | 72.7 | 74.3 | 74.3 |
| 直接埋立（%） | 23.4 | 23.0 | 21.6 | 20.4 | 17.0 | 14.9 | 14.4 |
| 資源化（%） | 4.0 | 4.2 | 4.5 | 5.2 | 10.2 | 10.7 | 11.3 |
| 焼却施設数 | - | 1870 | 1941 | 1873 | 1841 | 1864 | 1854 |
| 全連続炉施設数 | - | 397 | 425 | 426 | 435 | 438 | 433 |
| 発電付プラント数 | 78 | 82 | 92 | 101 | 112 | 118 | 127 |
| 埋立処分地数 | - | 2373 | 2334 | 2336 | 2250 | 2363 | 2321 |
| 処理費用（千円/t） | 24.2 | 24.6 | 25.9 | 28.1 | 31.9 | 37.6 | 46.3 |

表2 モルモットにおける半致死量（ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ）（藤木¹⁹より）

| | |
|--------------|---------|
| ボツリヌストキシン | 0.00003 |
| 破傷風トキシン | 0.0001 |
| 2,3,7,8-TCDD | 1 |
| テトロドトキシン | 8 |
| サリン | 10 |
| クラレー | 500 |
| ストリキニン | 500 |
| 青酸カリ | 10,000 |

表3 各国の耐容一日摂取量*（TDI）（ $\mu\text{g-TEQ}/\text{kg-体重}/\text{日}$ ）（酒井¹⁴より）

| | 日本 | | WHO | オランダ | スウェーデン | 英国 | カナダ | ドイツ | WHO欧州 | 米国** |
|-----|-----|-----|-----|-------|--------|----|-----|-------|-------|-------|
| | 厚生省 | 環境庁 | | | | | | | 事務局 | |
| TDI | 10 | 5 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 1~4 | 0.006 |
| | | | | (将来1) | | | | (将来1) | | ~0.01 |

*無毒性量に100倍の安全率を見ている。

**百万人に一人の生涯発がんリスクに相当する摂取レベル。

表4 日本の大都市域におけるダイオキシン類の摂取量（宮田¹⁸より）

| 媒体 | 一日摂取量 (pg-TEQ/kg/日) | | | 摂取割合 (%) |
|----|---------------------|--------|--------|----------|
| | PCDD+PCDF | Co-PCB | 合計 | |
| 食事 | 3.50 | 8.72 | 12.22 | 98.47 |
| 大気 | 0.18 | 0.01 | 0.19 | 1.53 |
| 水 | 0.00013 | 0.0013 | 0.0014 | 0.01 |
| 総計 | 3.68 | 8.73 | 12.41 | 100.0 |

表5 日本（大阪）における食物経由のPCDD+PCDFの一日摂取量とその構成比（宮田¹⁸より）

| 食事群 | (pg-TEQ/日) | (%) | 食事群 | (pg-TEQ/日) | (%) |
|-------|------------|------|--------|------------|-------|
| 魚介類 | 105.0 | 60.0 | 野菜・海藻 | 2.4 | 1.4 |
| 乳製品 | 18.0 | 10.3 | 豆製品 | 1.2 | 0.7 |
| 肉・卵類 | 17.5 | 10.0 | 調理食品 | 0.7 | 0.4 |
| 緑黄色野菜 | 11.0 | 6.3 | 調味料・飲料 | 0.6 | 0.3 |
| 米 | 11.0 | 6.3 | 果実 | 0.6 | 0.3 |
| 砂糖・菓子 | 3.0 | 1.7 | 穀類 | 0.2 | 0.1 |
| 油脂 | 2.9 | 1.7 | 合計 | 175.0 | 100.0 |

表6 焼却灰中のダイオキシン類（PCDD+PCDF）の平均濃度（pg-TEQ/g）（宮田¹⁸より）

| 炉形式 | 旧ガイドライン非適用 (1995年3月以前に稼働) | 旧ガイドライン適用 (1995年4月以降に稼働) |
|-----------|------------------------------|-----------------------------|
| 全連続炉 | 158 | 23 |
| 准連続炉・バッチ炉 | 505 | 99 |
| 全施設 | 333 | 53 |

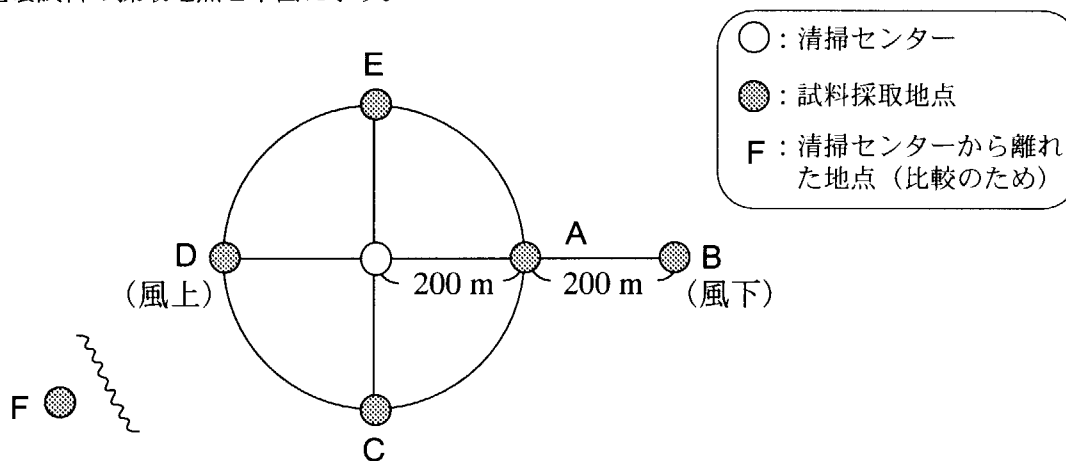
表7 飛灰中のダイオキシン類（PCDD+PCDF）の平均濃度（ng-TEQ/g）（宮田¹⁸より）

| 炉形式 | 集塵機の種類 | 旧ガイドライン非適用 (1995年3月以前に稼働) | 旧ガイドライン適用 (1995年4月以降に稼働) |
|---------------|-----------|------------------------------|-----------------------------|
| 全連続炉 | 電気集塵器 | 12.4 | 1.9 |
| | ろ過式集塵器 | 2.3 | 1.4 |
| 准連続炉・ バッチ炉 | 電気集塵器 | 19.0 | 2.8 |
| | ろ過式集塵器 | 2.4 | 3.1 |
| | マルチサイクロン等 | 9.4 | |
| 全施設 | | 14.8 | 2.5 |

表8 東海村のダイオキシン類の測定結果²⁵⁾

| 調査対象 | 調査項目・地点 | 分析結果 | |
|--------------|--------------------|--------|---------------------------|
| 清掃センター焼却炉施設 | 排ガス中の濃度 (1号焼却炉) | 170 | (pg-TEQ/Nm ³) |
| | 排ガス中の濃度 (2号焼却炉) | 58 | (pg-TEQ/Nm ³) |
| | 焼却灰中の濃度 (1号焼却炉) | 3.1 | (pg-TEQ/g) |
| | 焼却灰中の濃度 (2号焼却炉) | 4.8 | (pg-TEQ/g) |
| | 飛灰中の濃度 (1・2号焼却炉) | 955 | (pg-TEQ/g) |
| 最終埋立処分場 | 焼却灰 (飛灰含む) からの溶出濃度 | 2.2 | (pg-TEQ/l) |
| | 焼却灰 (飛灰含む) 中の含有濃度 | 970 | (pg-TEQ/g) |
| | 浸出水中の濃度 (原水) | 7.1 | (pg-TEQ/l) |
| | 浸出水中の濃度 (処理水) | 検出限度以下 | |
| 清掃センター周辺の土壌* | A地点 | 17 | (pg-TEQ/g) |
| | B地点 | 13 | (pg-TEQ/g) |
| | C地点 | 7.3 | (pg-TEQ/g) |
| | D地点 | 7.6 | (pg-TEQ/g) |
| | E地点 | 5.5 | (pg-TEQ/g) |
| | F地点 | 6.1 | (pg-TEQ/g) |

*土壌試料の採取地点を下図に示す。



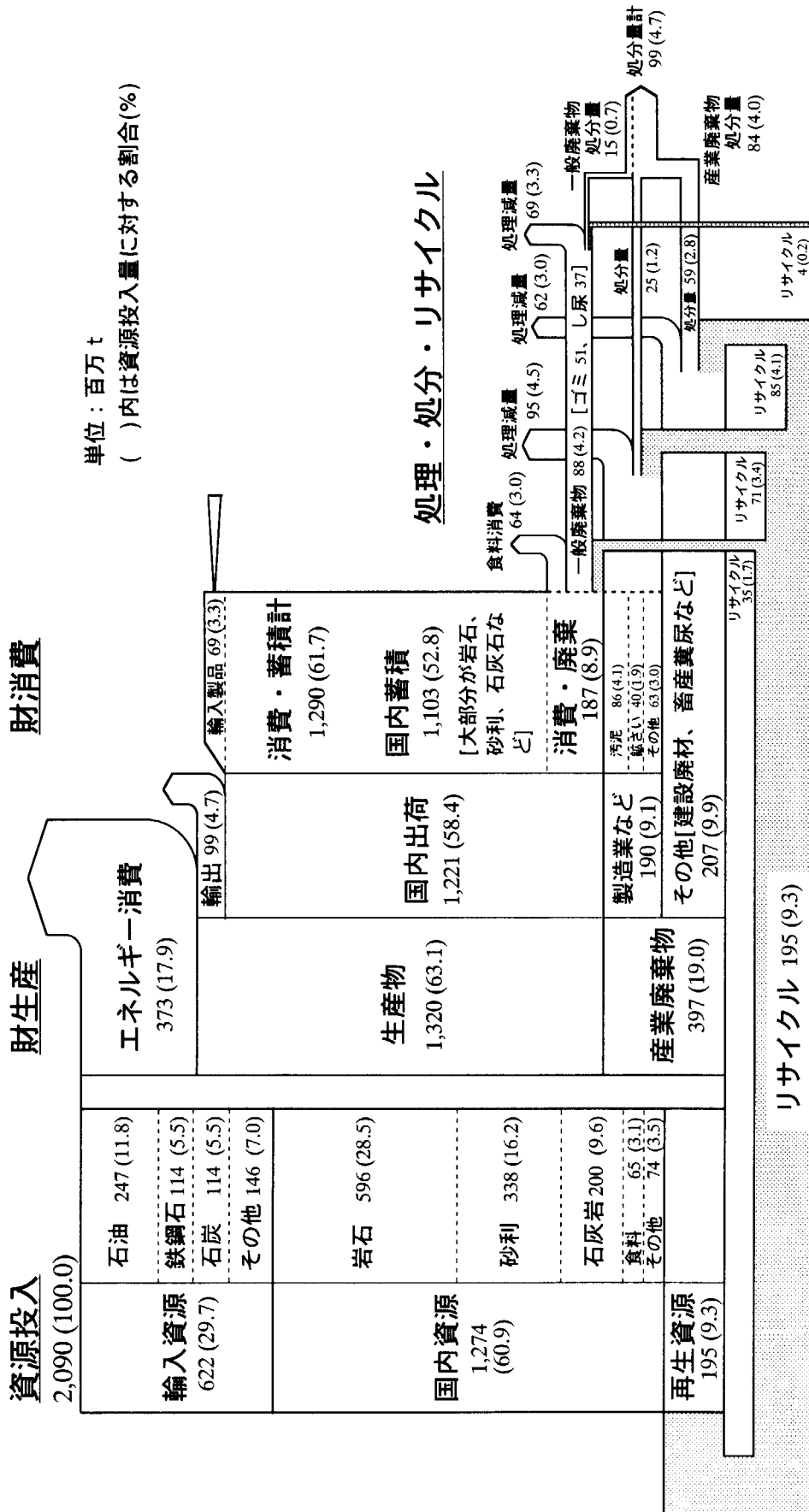


図1 1993年の日本のマテリアルバランス (酒井¹⁴⁾より)

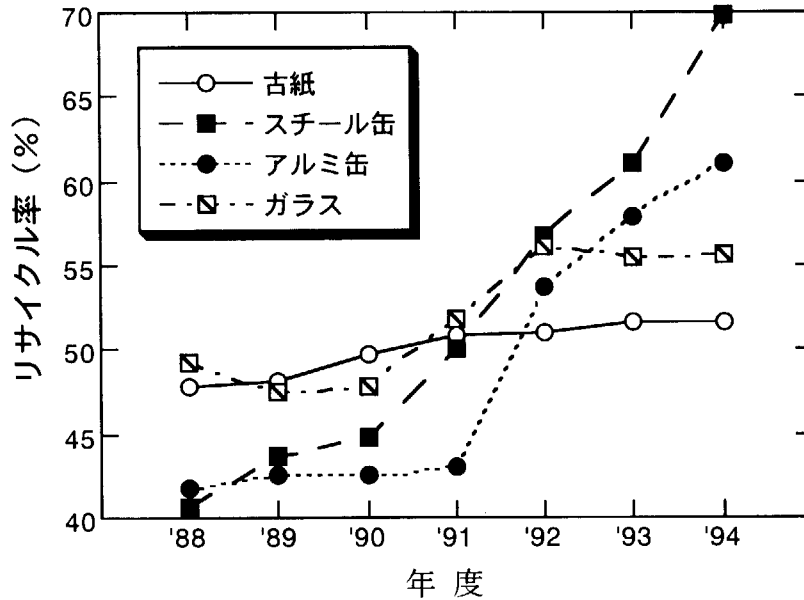


図2 日本の都市ゴミのリサイクル率の変遷 (酒井¹⁴⁾より)

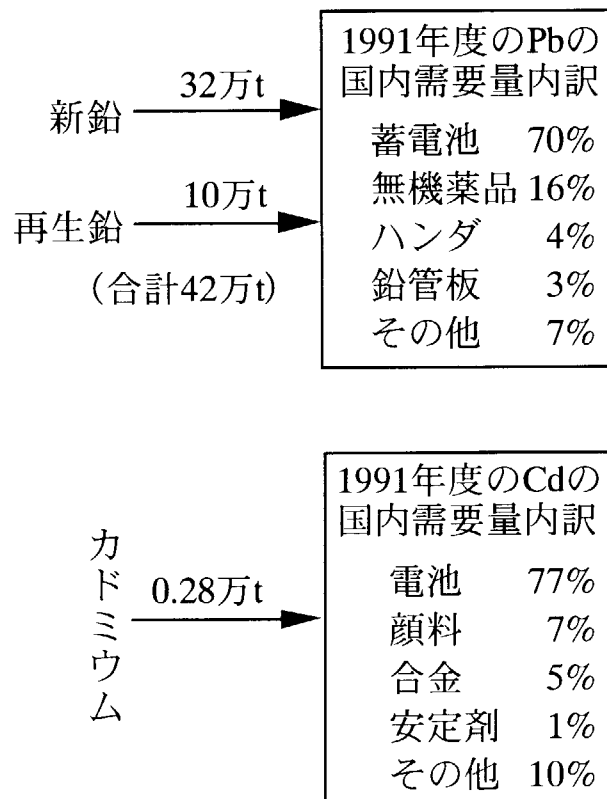


図3 鉛 (Pb) ・カドミウム (Cd) の国内需要量内訳 (酒井¹⁴⁾より)

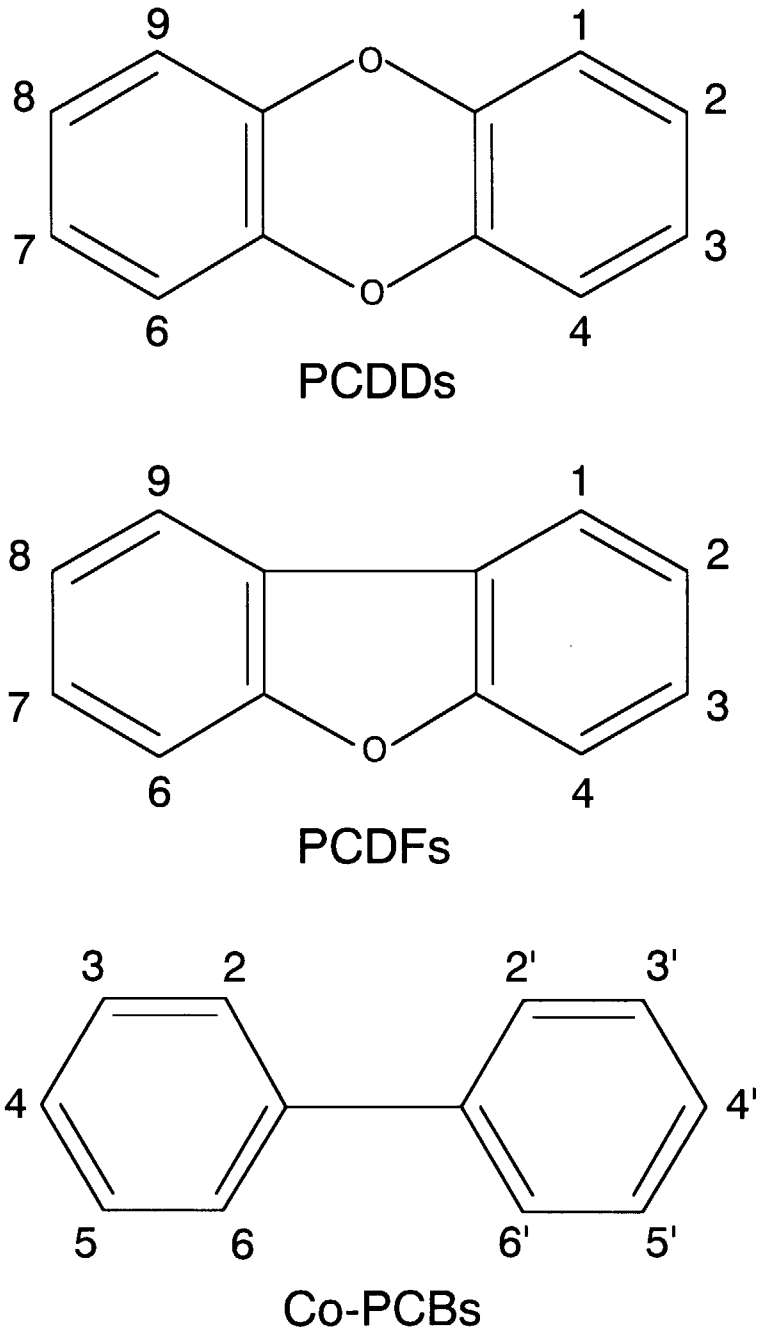


図4 ダイオキシン (PCDDs)、ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDFs)、コプラナー PCB (Co-PCB) の化学構造式とナンバリングシステム (宮田¹⁸⁾より)

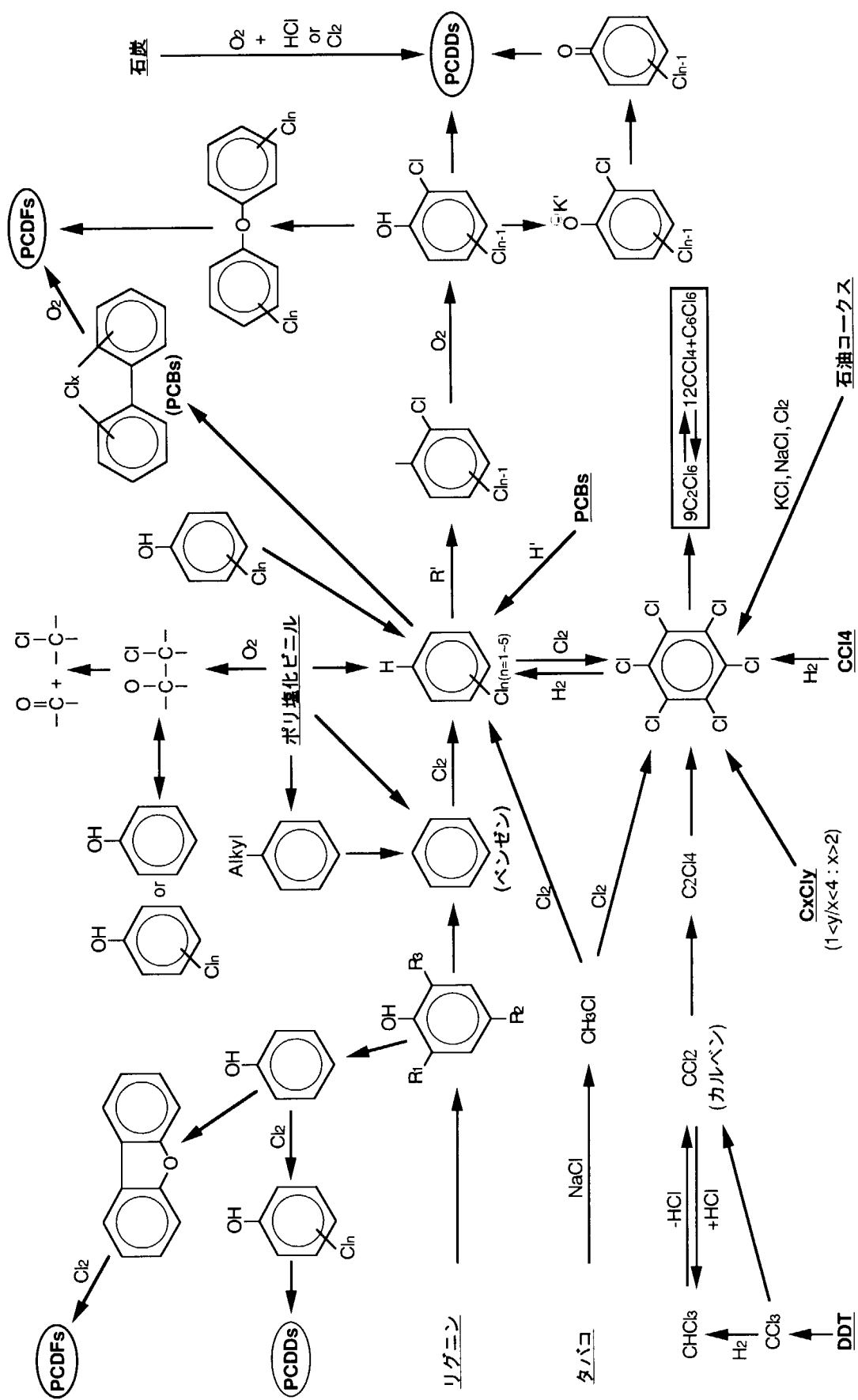


図5 ゴミ焼却における有機物からのダイオキシン類の生成機構 (酒井¹⁶⁾、宮田¹⁸⁾、藤木¹⁹⁾より)

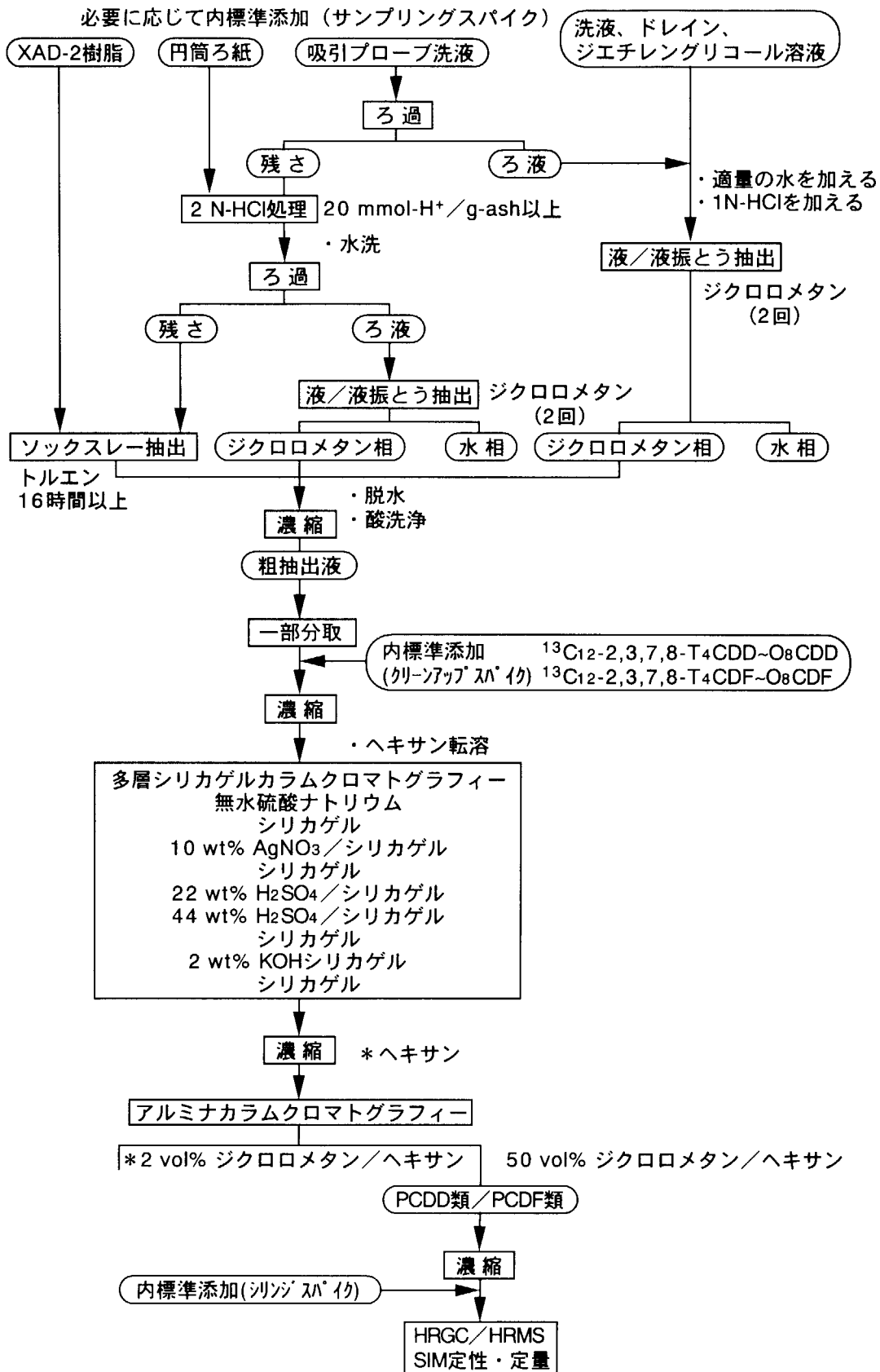


図6 公定法によるダイオキシン類の分析手順 (浦野²⁴⁾より)

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|---------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N·m |
| 工率, 放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量, 電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位, 電圧, 起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメンズ | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射線量 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量当量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オングストローム | Å |
| バーン | b |
| バル | bar |
| ガリ | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

| 力 | N (=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---|--------------------------|----------|----------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 |

粘度 1 Pa·s (= N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

| 圧 | MPa (=10 bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg (Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| 力 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322 × 10 ⁻⁴ | 1.35951 × 10 ⁻³ | 1.31579 × 10 ⁻³ | 1 | 1.93368 × 10 ⁻² |
| | 6.89476 × 10 ⁻³ | 7.03070 × 10 ⁻² | 6.80460 × 10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J (=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal (計量法) | Btu | ft·lbf | eV |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ |
| | 1.60218 × 10 ⁻¹⁹ | 1.63377 × 10 ⁻²⁰ | 4.45050 × 10 ⁻²⁶ | 3.82743 × 10 ⁻²⁰ | 1.51857 × 10 ⁻²² | 1.18171 × 10 ⁻¹⁹ | 1 |

1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15 °C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-------------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

